



## PROYECTO FIN DE CARRERA

### MEJORA DE LA INTEGRACIÓN DE LA GENERACIÓN EÓLICA MEDIANTE EL USO DE SISTEMAS DE PREDICCIÓN Y ALMACENAMIENTO



Alumno: Álvaro González Villarreal

Tutor UPNA: Javier Marcos Álvarez

Tutor ACCIONA: Eugenio Guelbenzu Michelena

Pamplona, 28 de mayo de 2015



## AGRADECIMIENTOS

A mi familia al completo, por su apoyo incondicional.

A Ramón, por todo.

A Eugenio Guelbenzu, por compartir su conocimiento.

A Javier Marcos, por su entera predisposición y cercanía.

A Raquel Rojo, por su paciencia y dedicación en el inicio.

A todo el departamento de Innovación de Acciona Energía. A Ana, Cristina, Andrea, Asun, Gunther, Miguel, Mikel, Maite y Javier.

## ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	3
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	6
ÍNDICE DE TABLAS	8
RESUMEN	9
ABSTRACT	9
1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 Variabilidad del viento y de la potencia generada en un parque eólico	10
1.2 Rol del almacenamiento y la predicción en el nuevo concepto de Sistema Eléctrico de Potencia	14
1.3 Conclusiones preliminares	16
2. OBJETIVO DEL PROYECTO	17
3. DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO DE ANÁLISIS	18
3.1 Parque eólico experimental de Barásoain	18
3.1.1 Localización y características del parque	18
3.1.2 Fluctuaciones de la potencia eólica en Barásoain	19
3.1.3 Efecto de agregación en el parque de Barásoain	21
3.2 Escenarios de turbina y parque	24
4. FUNCIONES DE CONTROL	25
4.1 Control de rampas	25
4.2 Filtrado de fluctuaciones	26
4.3 <i>Firming</i> de potencia	28
5. NOVEDADES INTRODUCIDAS EN EL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA (ESS)	29
5.1 Banda superior y banda inferior	29
5.2 Concepto de predicción	30
5.3 Limitación por debajo del 20% P <sub>n</sub>	31
6. DESCRIPCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS EMPLEADAS	32
6.1 ADOSA	32
6.2 Matlab	35
6.3 Microsoft Excel	35
6.4 PI DataLink Acciona	36
7. RECOPIACIÓN Y PRESENTACIÓN DE LOS DATOS OBJETO DE ESTUDIO	37



8.	ALGORITMOS	38
9.	SIMULACIONES	47
9.1	Una máquina	47
9.1.1	Estudio preliminar del control de rampas	47
9.1.2	Estudio 2: Sistema de almacenamiento <i>a priori</i> sobredimensionado	54
9.2	Parque completo	63
9.3	Comparativa	71
10.	RESULTADOS Y CONCLUSIONES	74
11.	PROPUESTA DE NUEVAS LÍNEAS DE DESARROLLO	76
12.	BIBLIOGRAFÍA	77
	ANEXO A: ESTUDIO PRELIMINAR DEL CONTROL DE RAMPAS DE POTENCIA EN UNA MÁQUINA AISLADA	78
	ANEXO B: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UNA MÁQUINA AISLADA CON UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO A <i>PRIORI</i> SOBREDIMENSIONADO	91
	ANEXO C: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL PARQUE COMPLETO DE BARÁSOAIN CON UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO A <i>PRIORI</i> SOBREDIMENSIONADO	102

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1.1 INFLUENCIA DEL PARÁMETRO DE ESCALA (A) EN LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL.....	11
ILUSTRACIÓN 1.2 CURVA DE POTENCIA DE UN AEROGENERADOR. ....	13
ILUSTRACIÓN 1.3 PREVISIÓN DE INTEGRACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA Y SU PORCENTAJE EN EL POOL ELÉCTRICO A NIVEL MUNDIAL (FUENTES: GWEC, EIA, ENERDATA). ....	14
ILUSTRACIÓN 3.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL PARQUE EXPERIMENTAL DE BARÁSOAIN.....	18
ILUSTRACIÓN 3.2 HISTOGRAMA VARIACIONES DE POTENCIA PARQUE EXPERIMENTAL BARÁSOAIN A LO LARGO DE UN AÑO .....	20
ILUSTRACIÓN 3.3 PORCENTAJE ACUMULADO DEL HISTOGRAMA DE VARIACIONES DE POTENCIA EN EL PARQUE EÓLICO DE BARÁSOAIN A LO LARGO DE UN AÑO. ....	21
ILUSTRACIÓN 3.4 HISTOGRAMA EFECTO DE AGREGACIÓN EN PARQUE BARÁSOAIN. ....	22
ILUSTRACIÓN 3.5 COMPORTAMIENTO ASINTÓTICO DEL EFECTO DE AGREGACIÓN EN PARQUE EÓLICO BARÁSOAIN. ....	23
ILUSTRACIÓN 4.1 CORRECCIÓN DEL RAMP-RATE MEDIANTE PROCESOS DE CARGA Y DESCARGA DEL ALMACENAMIENTO .....	25
ILUSTRACIÓN 4.2 CORRECCIÓN DE LA CURVA DE POTENCIA INYECTADA A RED MEDIANTE EL CONTROL DE RAMPAS. ....	26
ILUSTRACIÓN 4.3 SUAVIZADO DE LA CURVA DE POTENCIA APLICANDO EL CONCEPTO DE FILTRO DE PASO BAJO CON UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO. ....	27
ILUSTRACIÓN 4.4 APROXIMACIÓN DEL CONCEPTO DE FILTRADO A UN CONTROL DEL RAMP RATE. ....	27
ILUSTRACIÓN 4.5 CURVA DE ASEGURAMIENTO DE POTENCIA MEDIANTE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO. ....	28
ILUSTRACIÓN 5.1 CONCEPTO DE BANDAS DE CONTROL EN EL ESTADO DE CARGA DE LA BATERÍA. ....	29
ILUSTRACIÓN 5.2 FUNCIÓN MODULADORA DE LA CARGA SEGÚN SOC.....	30
ILUSTRACIÓN 6.1 IMAGEN DE PORTADA DE LA APLICACIÓN ADOSA .....	32
ILUSTRACIÓN 6.2 PANTALLA DE INTRODUCCIÓN DE DATOS DEL PARQUE EÓLICO SOBRE EL QUE IMPLEMENTAR ALMACENAMIENTO DE ADOSA. ....	33
ILUSTRACIÓN 6.3 PANTALLA DE CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ADOSA. ....	33
ILUSTRACIÓN 6.4 PANTALLA DEL APARTADO ECONÓMICO DEL SOFTWARE ADOSA. ....	34
ILUSTRACIÓN 6.5 PANTALLA DE ELECCIÓN DE ESCENARIOS DE LA APLICACIÓN ADOSA.....	34
ILUSTRACIÓN 6.6 PANTALLA DE RESULTADOS DE LA APLICACIÓN ADOSA. ....	35
ILUSTRACIÓN 6.7 DETALLE DE PARTE DE LA PLANTILLA CREADA EN MICROSOFT EXCEL PARA EL PROCESADO DE RESULTADOS.....	36
ILUSTRACIÓN 8.1 ALGORITMO SIMPLIFICADO CONTROL DEL <i>RAMP RATE</i> SIN LIMITACIÓN DE POTENCIA MÍNIMA .....	41
ILUSTRACIÓN 8.2 ALGORITMO SIMPLIFICADO CONTROL DEL <i>RAMP RATE</i> CON LIMITACIÓN DE POTENCIA MÍNIMA. ....	42
ILUSTRACIÓN 8.3 ALGORITMO SIMPLIFICADO SUAVIZADO DE POTENCIA SIN LIMITACIÓN DE POTENCIA MÍNIMA. ....	44
ILUSTRACIÓN 8.4 ALGORITMO SIMPLIFICADO DE SUAVIZADO DE POTENCIA CON LIMITACIÓN DE POTENCIA MÍNIMA. ....	45
ILUSTRACIÓN 9.1 PROCESO ITERATIVO DE DISEÑO DE SIMULACIONES. ....	47
ILUSTRACIÓN 9.2 REPRESENTACIÓN DE HISTOGRAMAS MÁS REPRESENTATIVOS DE $P_{STORAGE}$ , PARA $P=0,5$ MW, 0,55 MW Y 1 MW. ....	50
ILUSTRACIÓN 9.3 HISTOGRAMA DE INCUMPLIMIENTOS DENTRO DE UN UMBRAL DE DESVIACIÓN DE $\pm 500$ KW EN LA SIMULACIÓN 5 DEL ESTUDIO 1. ....	51
ILUSTRACIÓN 9.4 REPRESENTACIÓN DE HISTOGRAMAS DE SOC MÁS REPRESENTATIVOS DEL ESTUDIO PRELIMINAR DE RAMPAS.....	52
ILUSTRACIÓN 9.5 FLUJO DE POTENCIAS, CON SUS RENDIMIENTOS, EN LA BATERÍA. ....	53

ILUSTRACIÓN 9.6 HISTOGRAMA DE FLUCTUACIONES EN LA POTENCIA INYECTADA EN RED PARA TODAS LAS ESTRATEGIAS IMPLEMENTADAS EN EL ESCENARIO DE CONTROL DE RAMPAS DEL ESTUDIO 2.	56
ILUSTRACIÓN 9.7 MUESTRA DE LA PROBLEMÁTICA DERIVADA DE LA LIMITACIÓN DE ENTRADA EN FUNCIONAMIENTO DE LA BATERÍA EN CASO DE DESCONEXIONES O FLUCTUACIONES NEGATIVAS BRUSCAS.	56
ILUSTRACIÓN 9.8 HISTOGRAMA DE POTENCIA DE LA BATERÍA PARA TODAS LAS ESTRATEGIAS IMPLEMENTADAS EN EL ESCENARIO DE CONTROL DE RAMPAS DEL ESTUDIO 2, EXCLUIDOS LOS VALORES PS=0.	57
ILUSTRACIÓN 9.9 HISTOGRAMAS DEL ESTADO DE CARGA SOC PARA EL CASO DE CONTROL DE RAMPAS DEL ESTUDIO 2.	57
ILUSTRACIÓN 9.10 HISTOGRAMA DE FLUCTUACIONES EN LA POTENCIA INYECTADA EN RED PARA TODAS LAS ESTRATEGIAS IMPLEMENTADAS EN EL ESCENARIO DE SUAVIZADO DE POTENCIA DEL ESTUDIO 2.	59
ILUSTRACIÓN 9.11 HISTOGRAMA DE POTENCIA DE LA BATERÍA EN EL ESCENARIO DE SUAVIZADO DE POTENCIA DEL ESTUDIO 2, EXCLUIDOS LOS VALORES PS=0.	59
ILUSTRACIÓN 9.12 HISTOGRAMA DE SOC DE LA BATERÍA PARA LAS TRES ESTRATEGIAS EN EL ESCENARIO DE SUAVIZADO DE POTENCIA DEL ESTUDIO 2.	60
ILUSTRACIÓN 9.13 HISTOGRAMA DE POTENCIA DE LA BATERÍA EN EL ESCENARIO DE <i>FIRMING</i> DE POTENCIA DEL ESTUDIO 2, EXCLUIDOS LOS VALORES PS=0.	61
ILUSTRACIÓN 9.14 SOC PARA LAS TRES ESTRATEGIAS DE <i>FIRMING</i> DE POTENCIA DEL ESTUDIO 2 Y EXCLUYENDO EL CASO DE LIMITACIÓN DEL 20%.	62
ILUSTRACIÓN 9.15 HISTOGRAMA DE FLUCTUACIONES EN LA POTENCIA INYECTADA EN RED PARA TODAS LAS ESTRATEGIAS IMPLEMENTADAS EN EL ESCENARIO DE CONTROL DE RAMPAS DEL ESTUDIO 3.	64
ILUSTRACIÓN 9.16 HISTOGRAMA DE POTENCIA DE LA BATERÍA EN EL ESCENARIO DE CONTROL DE RAMPAS DE POTENCIA DEL ESTUDIO 3, EXCLUIDOS LOS VALORES PS=0.	65
ILUSTRACIÓN 9.17 HISTOGRAMA DE SOC DE LA BATERÍA PARA LAS TRES ESTRATEGIAS EN EL ESCENARIO DE CONTROL DE RAMPAS DE POTENCIA DEL ESTUDIO 3.	66
ILUSTRACIÓN 9.18 HISTOGRAMA DE FLUCTUACIONES EN LA POTENCIA INYECTADA EN RED PARA TODAS LAS ESTRATEGIAS IMPLEMENTADAS EN EL ESCENARIO DE SUAVIZADO DE POTENCIA DEL ESTUDIO 3.	67
ILUSTRACIÓN 9.19 HISTOGRAMA DE POTENCIA DE LA BATERÍA EN EL ESCENARIO DE SUAVIZADO DE POTENCIA DEL ESTUDIO 3, EXCLUIDOS LOS VALORES PS=0.	68
ILUSTRACIÓN 9.20 HISTOGRAMA DE SOC DE LA BATERÍA PARA LAS TRES ESTRATEGIAS EN EL ESCENARIO DE SUAVIZADO DE POTENCIA DEL ESTUDIO 3.	68
ILUSTRACIÓN 9.21 HISTOGRAMA DE POTENCIA DE LA BATERÍA EN EL ESCENARIO DE <i>FIRMING</i> DE POTENCIA DEL ESTUDIO 3, EXCLUIDOS LOS VALORES PS=0.	69
ILUSTRACIÓN 9.22 HISTOGRAMA DE SOC DE LA BATERÍA PARA LAS TRES ESTRATEGIAS EN EL ESCENARIO DE <i>FIRMING</i> DE POTENCIA DEL ESTUDIO 3.	70
ILUSTRACIÓN 9.23 PORCENTAJE DE POTENCIA, CON RESPECTO A LA POTENCIA NOMINAL, NECESARIA PARA ABSORBER EL 99% DE LOS EVENTOS DE CARGA O DESCARGA, EN TODOS LOS CASOS ESTUDIADOS.	72
ILUSTRACIÓN 9.24 ENERGÍA TOTAL TRASEGADA POR LA BATERÍA EN TODOS LOS CASOS ESTUDIADOS EN MWH.	73

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS AEROGENERADORES INSTALADOS EN EL PARQUE DE BARÁSOAIN.....	19
TABLA 3.2 FLUCTUACIONES DE LA POTENCIA ELÉCTRICA INYECTADA A RED DESDE EL PARQUE EÓLICO DE BARÁSOAIN A LO LARGO DE UN AÑO.....	20
TABLA 3.3 FLUCTUACIONES DE POTENCIA INCLUIDAS DENTRO DE LOS INTERVALOS [-1%, 1%], [-5%, 5%], (-10%, 10%) Y (-15%, 15%) EN BARÁSOAIN. ....	21
TABLA 3.4 HISTOGRAMA EFECTO DE AGREGACIÓN EN PARQUE BARÁSOAIN.....	22
TABLA 9.1 RESUMEN DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS EN EL ESTUDIO 1, CONTROL DE RAMP RATE EN UNA MÁQUINA AISLADA. ....	48
TABLA 9.2 PRINCIPALES RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO DE CONTROL DE RAMPAS PRELIMINAR.....	49
TABLA 9.3 RESULTADOS USO DE BATERÍA EN ESTRATEGIA CONTROL DE RAMPAS, ESTUDIO 2. ....	55
TABLA 9.4 USO DE BATERÍA EN EL ESCENARIO DE SUAVIZADO DE POTENCIA DEL ESTUDIO 2. ....	58
TABLA 9.5 USO DE BATERÍA EN EL ESCENARIO DE <i>FIRMING</i> DE POTENCIA DEL ESTUDIO 2. ....	60
TABLA 9.6 PRINCIPALES RESULTADOS SIMULACIÓN PARQUE COMPLETO ESCENARIO CONTROL DE RAMPA. ....	64
TABLA 9.7 FLUCTUACIONES INCLUIDAS DENTRO DE LOS INTERVALOS [-5, 5], (-10, 10] Y (-15, 15] EN ESCENARIO DE CONTROL DE RAMPAS DEL ESTUDIO 3. ....	65
TABLA 9.8 PRINCIPALES RESULTADOS SIMULACIÓN PARQUE COMPLETO ESCENARIO SUAVIZADO DE POTENCIA.....	66
TABLA 9.9 FLUCTUACIONES INCLUIDAS DENTRO DE LOS INTERVALOS [-1, 1], [-5, 5], (-10, 10] Y (-15, 15] EN ESCENARIO DE SUAVIZADO DE POTENCIA DEL ESTUDIO 3. ....	67
TABLA 9.10 PORCENTAJE DE POTENCIA, CON RESPECTO A LA POTENCIA NOMINAL, NECESARIA PARA ABSORBER EL 99% DE LOS EVENTOS DE CARGA O DESCARGA, EN TODOS LOS CASOS ESTUDIADOS. ....	71
TABLA 9.11 DATOS DE ENERGÍA TRASEGADA POR LA BATERÍA PARA TODOS LOS CASOS ESTUDIADOS EN MWH.....	73

## RESUMEN

La creciente importancia de la potencia eólica en el mix energético mundial convierte la gestión de su inherente variabilidad en una cuestión prioritaria. Este Proyecto Fin de Carrera demuestra, a través de procesos de simulación, que un único sistema de almacenamiento y predicción, convenientemente dimensionado y en conjunción con los algoritmos de control adecuados, permite gestionar las fluctuaciones en la potencia eólica mediante tres estrategias de control diferentes: la limitación de rampas de potencia, el suavizado de la curva de potencia inyectada en red y el *firmiting* de potencia.

Las novedades introducidas en este Proyecto Fin de Carrera – consistentes en la adición de bandas de control del estado de carga del almacenamiento, la predicción y la limitación de potencia mínima para la entrada en funcionamiento de los elementos– generan una mejor gestión del sistema, así como un potencial alargamiento de la vida útil del mismo.

## ABSTRACT

The rising importance of wind power within the global energy mix turns its inherent variability into a prime priority. This Final Thesis Project demonstrate, through simulation processes, that one unique energy storage and prediction system, in a proper dimension and in conjunction with the adequate control algorithms, allows managing wind power fluctuations by means of three different strategies: ramp rate control, smoothing of wind power curve and power firming.

The novelties introduced in this Final Thesis Project – consisting on the addition of state of charge control bands, prediction and a minimum power limitation in order to allow the system to operate – generate a better management of the structure, as well as a potential extension of its useful life.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Variabilidad del viento y de la potencia generada en un parque eólico

El viento surge como consecuencia de las diferencias de presiones que se producen en la superficie terrestre. Estos gradientes de presión entre un punto de la atmósfera y otro se derivan, en esencia, del calentamiento del planeta. Calentamientos desiguales de la superficie terrestre y el flujo de calor a través de corrientes oceánicas, en conjunto con orografías abruptas, hacen del viento una fuente que varía considerablemente tanto en velocidad como en dirección.

Conjugados, estos dos aspectos inciden en la posibilidad de su aprovechamiento en la generación de energía eléctrica. Sin embargo, la realidad confirma que caracterizar la dirección aérea reviste gran complejidad, por lo que se tiende a centrar el esfuerzo en estudiar la velocidad del viento. Dentro de un parque eólico, la velocidad del viento muestra variaciones tanto en su duración como en el espacio. En la Europa continental suelen apreciarse variaciones diarias y estacionales de la velocidad del viento. Según zonas, esa velocidad difiere durante el día y también varía por la noche y entre las estaciones cálidas y las frías.

A la hora de generar potencia eléctrica, la componente horizontal de la velocidad del viento se erige como la principal causante del giro del rotor del aerogenerador. Por consiguiente, interesa considerar esta componente para intentar prever el comportamiento de un parque y sus presumibles fluctuaciones. Es posible descomponer la velocidad horizontal del viento, tal como se aprecia en la ecuación (1.1):

$$v_v(t) = v_m + v_r(t) + v_{raf}(t) + v_t(t) \quad (1.1)$$

Donde:

$v_m$ : valor promedio de la velocidad del viento.

$v_r(t)$ : componente rampa de la velocidad del viento.

$v_{raf}(t)$ : componente de ráfaga de la velocidad del viento.

$v_t(t)$ : componente de turbulencia de la velocidad del viento.

El valor promedio de la velocidad del viento ( $v_m$ ) no resulta decisivo para elaborar el estudio de las fluctuaciones, ya que se trata de un parámetro atemporal que no se altera. La componente rampa ( $v_r(t)$ ) describe un incremento o decremento continuo de la velocidad del viento. Se trata de un término muy pertinente para el estudio de la variabilidad. La velocidad de ráfaga ( $v_{raf}(t)$ ) representa las fluctuaciones rápidas – en periodos de tiempo muy breves, que pueden ser de unos pocos segundos – que se

producen en el viento. Por último, la componente turbulencia ( $v_t(t)$ ) refleja el comportamiento errático y pobremente predecible del viento en determinadas situaciones.

Estas velocidades cobrarán sentido en función del intervalo de muestreo que se emplee. La velocidad de turbulencia se adaptará a períodos inferiores a 10 minutos, mientras que la componente de ráfaga solamente será útil cuando las muestras se tomen como máximo minutalmente. La velocidad de rampa, sin embargo, tendrá sentido sea cual sea el intervalo de muestreo. Es por esta razón por la que la velocidad de rampa es un parámetro importante en la caracterización de la variabilidad del viento.

En un intento de predecir el comportamiento futuro del viento en un emplazamiento dado, se anotan las mediciones de la velocidad del viento y se tratan estos datos con modelos estadísticos. Cuando corresponde al estudio de la fluctuación de la velocidad del tiempo, los principales parámetros de interés resultan ser la media aritmética, la desviación estándar y las variaciones en determinadas escalas de tiempo. Por eso, la muestra tomada debe ser lo suficientemente amplia para que sea representativa.

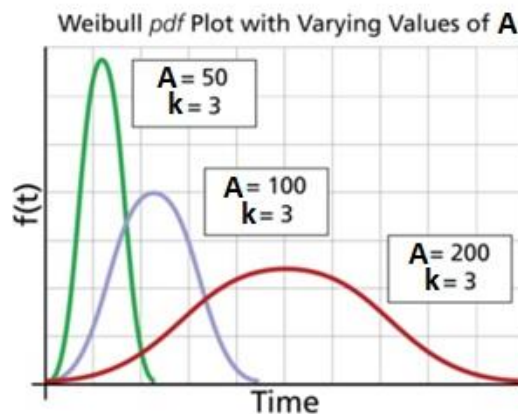
De estos datos se extrae la función de probabilidad de la velocidad del viento, que se corresponde típicamente, como ya es sabido, a una distribución del tipo Weibull.

$$f(v, A, k) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} e^{-(v/A)^k} \quad (1.2)$$

De esta forma la distribución de probabilidad acumulada queda de la siguiente manera:

$$CDF(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} \quad (1.3)$$

Cuanto mayor es el parámetro  $A$ , mayor es la probabilidad de que nos encontremos valores extremos, como se puede apreciar en la Ilustración 1.1.



**Ilustración 1.1** Influencia del parámetro de escala ( $A$ ) en la distribución de Weibull.

## Fluctuaciones en la potencia eólica

La potencia eólica teórica de una masa de aire que circula a través del rotor de un aerogenerador es función de la densidad del viento, del área de barrido del rotor, y del cubo de la velocidad del viento, tal como se muestra en la ecuación (1.4):

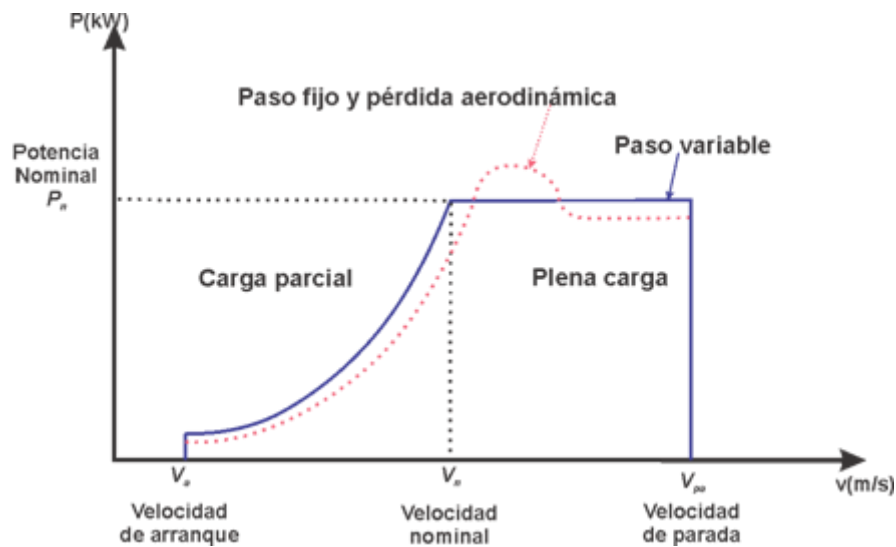
$$P_{eólica} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1.4)$$

Puede decirse, por tanto, que la causa principal de las fluctuaciones en la potencia eólica anida en las variaciones en la velocidad del viento. La velocidad del viento constituye, pues, el parámetro que más afecta a la potencia eólica. Al estar elevada al cubo, mínúsculas variaciones en la velocidad del viento implicarán altas fluctuaciones en la potencia.

Sin embargo, también interviene otra serie de factores que provocan, además, que la correlación entre la velocidad del viento y la potencia eólica no resulte lineal ni, en muchos casos, biyectiva. La mayoría deriva del hecho de que, a diferencia de la radiación solar, la velocidad del viento varía notablemente en espacios muy cortos. Algunos de estos factores son los que siguen:

- ✓ Las mediciones de viento no se realizan en la góndola de la máquina, sino en puntos distantes al aerogenerador.
- ✓ El área de barrido del rotor resulta notablemente amplia (en torno a los cien metros de diámetro), por lo que la velocidad del viento varía de un punto a otro de la pala.
- ✓ Tras el paso del viento por una turbina, este pierde potencial energético y velocidad, por lo que dentro de un parque algunas máquinas se ven perjudicadas por las sombras de otras y su eficacia se merma.
- ✓ A pesar de que, por efecto de la inercia, la velocidad del viento se vea reducida, el rotor no se frena al mismo ritmo.
- ✓ El control que se ejerce sobre la máquina también produce que, por debajo de la velocidad de *cut-in* y por encima de la de *cut-out*, para un rango muy amplio de velocidades la potencia entregada sea la misma.





**Ilustración 1.2** Curva de potencia de un aerogenerador.

- ✓ También afecta la red a la que se conecta y su estabilidad.

Tras la conversión a potencia eléctrica de la potencia del viento, se produce un filtrado y suavizado de la variabilidad con respecto a la velocidad del aire. Además, la función de probabilidad deja de asemejarse a una distribución de tipo Weibull. Ahora las mayores congregaciones de eventos se encuentran en torno a la potencia nula y a la potencia nominal, ya que hay muchas velocidades diferentes ligadas a estos dos valores.

### Rampas

En 2004, un estudio de Brian Parsons, del National Renewable Energy Laboratory, propuso el uso de rampas como método de caracterización de las fluctuaciones en la potencia eólica. Definiendo el concepto de rampa como se muestra en la ecuación (1.5):

$$P_{ramp} = \frac{\overline{P_{n+1}(t)} - \overline{P_n(t)}}{T} \quad (1.5)$$

donde:

$\overline{P_{n+1}(t)}$ : Potencia media producida en el intervalo  $n + 1$

$\overline{P_n(t)}$ : Potencia media producida en el intervalo  $n$

Los dos parámetros que caracterizan los cambios en la producción son el tamaño de la rampa y su propia duración. De forma estadística, las fluctuaciones de la potencia eólica se suelen representar mediante la desviación estándar de las rampas. Conviene

destacar que, en la realidad, la distribución de las rampas no siempre obedece a una distribución normal centrada en cero.

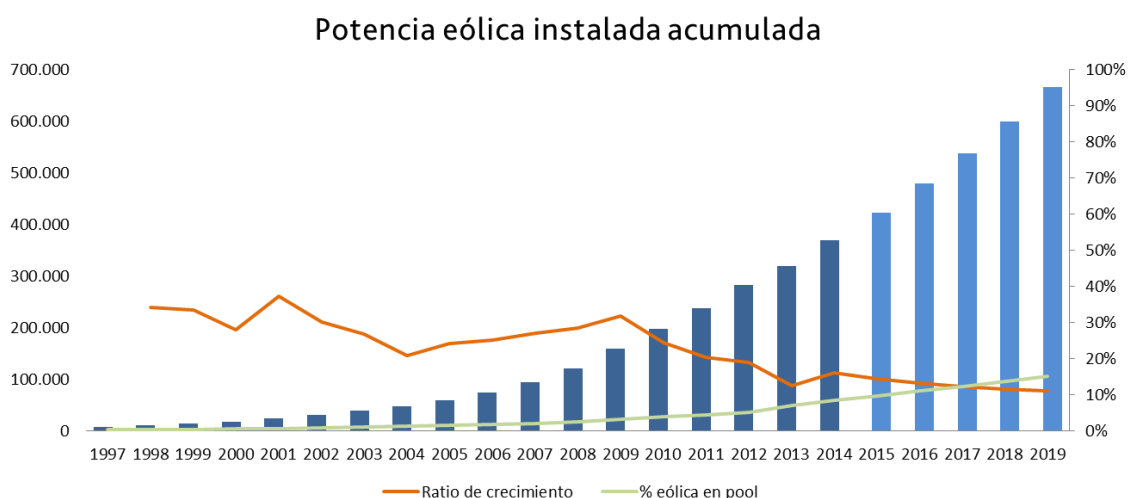
Por consiguiente, en este proyecto final de carrera se utiliza la definición de rampa para la caracterización de las fluctuaciones y la cuantificación de las mejoras introducidas en el sistema por el almacenamiento.

### *Estudiando el parque completo*

En el parque completo, cambia el rango en el que se operan las fluctuaciones. Puede darse el caso de que, mientras una máquina esté trabajando a carga parcial, otra puede estar en ese mismo instante a pleno rendimiento. Esto se conoce como efecto de suavizado debido a la agregación (*smoothing effect*). Consiste en la disminución porcentual de las variaciones eólicas conforme se produce la agregación de unidades de producción eólica. Las oscilaciones de diferentes turbinas se compensan entre sí. Por consiguiente, cuanto mayor sea el tamaño del parque, menores serán las fluctuaciones de potencia eólica en términos porcentuales.

## 1.2 Rol del almacenamiento y la predicción en el nuevo concepto de Sistema Eléctrico de Potencia

Se asume inevitable que el sistema eléctrico de potencia está derivando hacia una concepción en la que destacan dos aspectos importantes. Por un lado, la tendencia hacia una generación eléctrica más descentralizada, reduciendo así las pérdidas de potencia y el coste derivados del transporte de la energía y de las diferentes transformaciones de tensión. Por otro lado, el compromiso de reducir los impactos medioambientales, mediante la integración de más energía de origen renovable y la mejora de la eficiencia de aquellas tecnologías no renovables.



**Ilustración 1.3** Previsión de integración de energía eólica y su porcentaje en el pool eléctrico a nivel mundial (Fuentes: GWEC, EIA, Enerdata).

En este nuevo escenario el control de la estabilidad de la relación oferta-demanda y de la robustez y resiliencia de la red se antoja de gran importancia. El almacenamiento de energía, en conjunción con un sistema de predicción efectivo, puede desempeñar un papel importante en estos retos, mejorando la operatividad de la red, reduciendo costes y asegurando una alta fiabilidad del sistema. Además podría constituir una reducción sustancial en las inversiones de infraestructura necesarias para mantener el sistema en los términos actuales.

El desarrollo tecnológico de sistemas de almacenamiento efectivos derivaría en importantes ventajas:

- Reducir las oscilaciones en la potencia inyectada a la red proveniente de fuentes de energía de naturaleza variable como solar o eólica, aumentando así el valor de las energías renovables. El Sistema de almacenamiento de energía (ESS, por sus siglas en inglés) puede realizar este suavizado de la potencia mediante diferentes estrategias. Ya sea actuando como un filtro de paso bajo o limitando las rampas derivadas de las variaciones de potencia de la fuente. De este modo, se podrá contribuir de forma sustancial a la integración de una mayor cantidad de energías renovables en el sistema.
- Aumentar la seguridad y el aprovechamiento de la red, pudiendo actuar ante huecos de tensión o caídas de centrales de generación.
- Afianzar un sistema de generación distribuida, mejorando la viabilidad de aquellos emplazamientos más críticos o en los que la interacción con la red sea mayor. Los ESS convertirían a cada emplazamiento en más aprovechable, independiente e integrable con el resto de actores del sistema eléctrico de potencia.
- Mejorar la eficiencia de la infraestructura ya existente y reducir la emisión de gases de efecto invernadero. Los ESS pueden desempeñar el papel que actualmente juegan las centrales de punta, de reserva y de socorro, permitiendo así dar acogida a diversas situaciones que en otras ocasiones se realizarían mediante el arranque de centrales convencionales. Aprovechando la energía ya almacenada en el ESS, la emisión de gases de efecto invernadero sería considerablemente menor. Mediante la mejora del rendimiento de plantas de todo tipo ya existentes y herramientas de transformación y distribución, se aumentará además la vida útil de los equipos ya amortizados.
- La implantación de ESS optimizados convertiría a la red actual en una mucho más fiable debido a la posibilidad de actuar de forma instantánea ante caídas y emergencias de cualquier tipo.
- Impulsar la electrificación de los medios de transporte y la integración entre estos y la red. El desarrollo de sistemas de almacenamiento no solo contribuirá a la expansión de los vehículos eléctricos, sino también a potenciales aplicaciones de segundo uso de las baterías.

Para llegar a esta situación, los ESS deben pasar por un proceso de desarrollo todavía largo en el que adquirirán especial importancia cuatro retos relacionados con su expansión:

- Conseguir tecnologías de almacenamiento económicamente competitivas, mediante la optimización de los ciclos de carga y descarga, la densidad de energía
- Validación de la fiabilidad y seguridad de los ESS. Existe la necesidad de implementar un protocolo de seguridad estandarizado internacional.
- Constitución de un marco de regulación equiparable y estandarizado: supresión de barreras legales y conocimiento detallado de los beneficios económicos derivados del uso de cada una de las estrategias de almacenamiento.
- Aceptación por parte de la industria.

### 1.3 Conclusiones preliminares

Siendo evidente el carácter fluctuante del recurso eólico y su repercusión en la calidad de la potencia que se inyecta a la red, parece razonable pensar, según las previsiones de instalación de energía eólica y la creciente influencia de esta tecnología en el mix energético, que el desarrollo de sistemas de almacenamiento que trabajen en conjunción con plantas de generación eólica puede ser una solución factible al problema. Para ello, debe superarse una fase de desarrollo en la que es necesaria la realización de inversiones económicas e investigaciones técnicas que permitan que el almacenamiento de energía se convierta en una realidad de coste relativamente reducido.

Por otro lado, puede resultar también productiva la elaboración de sistemas de predicción de la velocidad del viento. De este modo se posibilitaría una mejor gestión de todos los parques eólicos existentes, tanto si incorporan almacenamiento como si no.

## 2. OBJETIVO DEL PROYECTO

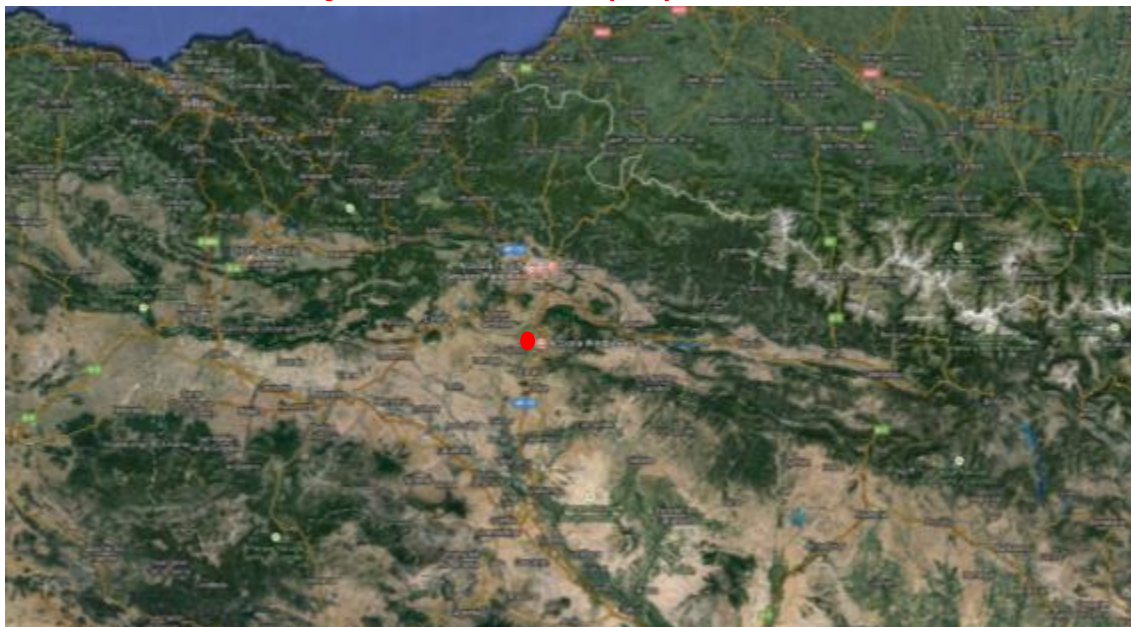
El objetivo que persigue este Proyecto Fin de Carrera es comprobar la viabilidad de la implantación de un sistema de almacenamiento de energía en el parque experimental de Barásoain. Para ello se lleva a cabo, según se detalla más adelante, una serie de simulaciones con un *software* creado por Acciona Energía y que ha sido además ampliado y depurado dentro del marco de este Proyecto Fin de Carrera. Tras dichas simulaciones se consideran los resultados obtenidos con la finalidad de extraer conclusiones que garanticen la consecución de los objetivos planteados. Así pues, los fines complementarios que proceden del presente estudio apuntan a:

- ✓ Ampliar los conocimientos actuales en materia de almacenamiento de energía a gran escala que posee la Empresa.
- ✓ Observar la mejoría en la gestión de un parque de generación o de una turbina eólica derivada de la inclusión en paralelo de un sistema de almacenamiento.
- ✓ Examinar las diferentes técnicas de control en la gestión de la generación eólica (restricción del *ramp rate*, suavizado de la curva de potencia mediante un filtrado de primer orden, aseguramiento de un *firming* de potencia, etc.) y los requerimientos del sistema de almacenamiento en cada uno de los casos.
- ✓ Conocer el comportamiento tanto del parque y las máquinas como del sistema de almacenamiento en un entorno de trabajo conjunto y bidireccional.
- ✓ Determinar de forma cualitativa y cuantitativa el dimensionamiento y las características adecuadas (tipo de almacenamiento, su capacidad, potencias de carga y descarga, eficiencias, etc.) del sistema de almacenamiento que se considere idóneo instalar en el parque eólico de Barásoain.
- ✓ Depurar, optimizar y ampliar los algoritmos de control diseñados para la implantación conjunta del sistema de almacenamiento y predicción en el parque de generación eólica.

### 3. DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO DE ANÁLISIS

#### 3.1 Parque eólico experimental de Barásoain

##### 3.1.1 Localización y características del parque



**Ilustración 3.1** Localización geográfica del parque experimental de Barásoain

Por razones estratégicas, la tesis de este Proyecto Final de Carrera se centra en el parque eólico experimental de Barásoain, propiedad de Acciona Energía (Acciona Windpower). Este parque está compuesto por cinco turbinas AW 3000 desarrolladas por Acciona Windpower, cuya potencia nominal es de 3000 kW. Una de ellas presenta un rotor de 116 metros de diámetro y las otras cuatro de 100m. Se trata de máquinas con control de *pitch* y de *yaw* con las características que se especifican en la Tabla 3.1.

	AW-3000/116	AW-3000/100
Número de máquinas en parque	1	4
<b>Datos generales</b>		
Área de barrido	10 569 m <sup>2</sup>	7 854 m <sup>2</sup>
Densidad de potencia	0.036 m <sup>2</sup> /kW	0.027 m <sup>2</sup> /kW
Número de palas	3	3
Limitación de potencia	Pitch	Pitch
<b>Rotor</b>		
Velocidad del rotor	12,3 vuelta/min	14,2 vuelta/min
Velocidad mínima de viento	3 m/s	4 m/s
Velocidad nominal de viento	10,6 m/s	12 m/s
Velocidad máxima de viento	20 m/s	25 m/s

<b>Reductora</b>		
Reductora	Sí	Sí
<b>Generador</b>		
Tipo	Inducción doblemente alimentado (DFIG)	Inducción doblemente alimentado (DFIG)
Número	1	1
Velocidad de salida máxima del generador	1320/1584 vuelta/min	1320/1584 vuelta/min
<b>Torre</b>		
Altura de la góndola	92 m / 100 m / 120 m	100 m
Fabricante	Acciona Windpower	Acciona Windpower

**Tabla 3.1** Características técnicas de los aerogeneradores instalados en el parque de Barásoain.

### 3.1.2 Fluctuaciones de la potencia eólica en Barásoain

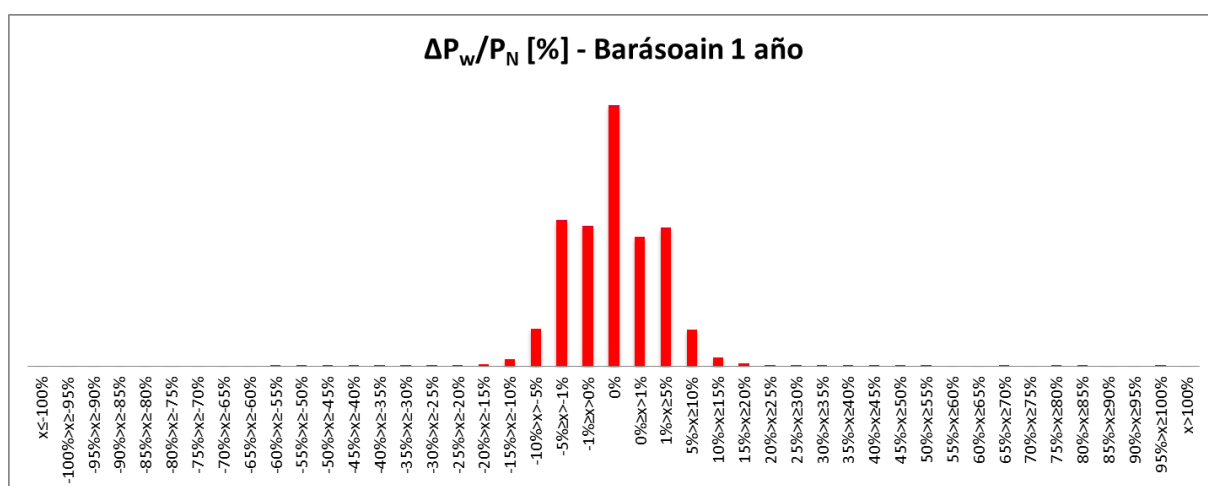
Barásoain constituye una instalación en funcionamiento desde 2013 y de la que se dispone de datos reales de la potencia eléctrica inyectada a la red por cada una de las cinco máquinas que lo componen. El estudio de las fluctuaciones en la potencia activa producida se realiza en términos porcentuales con respecto a la potencia nominal instalada, implementando la ecuación (3.1):

$$\Delta P_i [\%] = \frac{P_i - P_{i-1}}{P_N} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Conocer en qué rangos de fluctuaciones se encuentra el parque permite predecir qué características primordiales del sistema de almacenamiento conviene introducir, así como los algoritmos de control que haya que manejar. Para ello, se completa un análisis estadístico de las variaciones de potencia registradas a lo largo de doce meses, medidas minuto a minuto, cuyos resultados en forma de histograma se muestran en la Tabla 3.2 y en las Ilustración 3.2 y Ilustración 3.3:

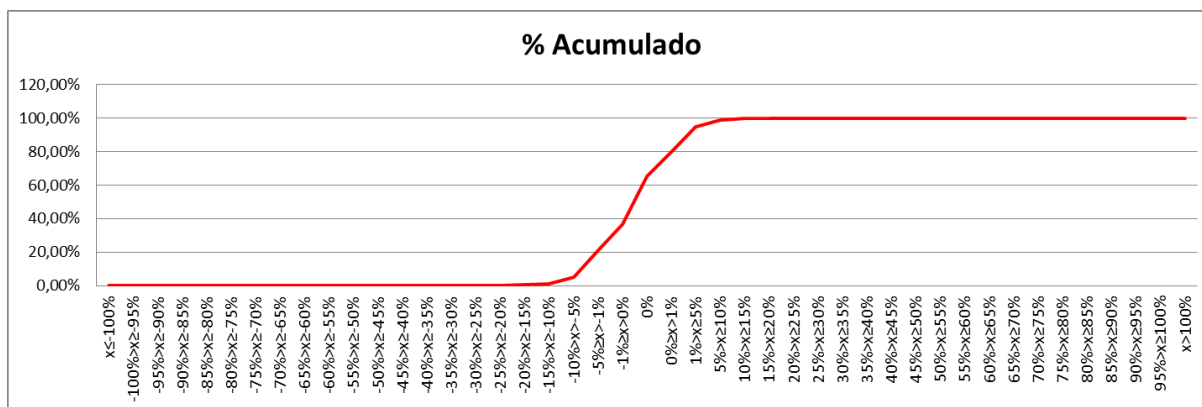
Intervalo	Frecuencia	% Acumulado
$x \leq -35\%$	16	0,00%
$-35\% < x \leq -30\%$	31	0,01%
$-30\% < x \leq -25\%$	59	0,02%
$-25\% < x \leq -20\%$	203	0,06%
$-20\% < x \leq -15\%$	1.170	0,28%
$-15\% < x \leq -10\%$	4.222	1,08%
$-10\% < x < -5\%$	21.583	5,19%
$-5\% \leq x < -1\%$	84.570	21,28%
$-1\% \leq x < 0\%$	80.844	36,66%
$0\%$	150.449	65,29%
$0\% < x \leq 1\%$	74.604	79,48%
$1\% < x \leq 5\%$	79.854	94,67%
$5\% < x \leq 10\%$	21.202	98,71%
$10\% < x \leq 15\%$	4.877	99,64%
$15\% < x \leq 20\%$	1.498	99,92%
$20\% < x \leq 25\%$	282	99,97%
$25\% < x \leq 30\%$	80	99,99%
$30\% < x \leq 35\%$	38	100,00%
$x > 35\%$	17	100,00%

**Tabla 3.2** Fluctuaciones de la potencia eléctrica inyectada a red desde el parque eólico de Barásoain a lo largo de un año.



**Ilustración 3.2** Histograma variaciones de potencia parque experimental Barásoain a lo largo de un año





**Ilustración 3.3** Porcentaje acumulado del histograma de variaciones de potencia en el parque eólico de Barásoain a lo largo de un año.

[-1, 1]	305.897	58,20%
[-5, 5]	470.321	89,48%
[-10,10]	513.106	97,62%
[-15,15]	522.205	99,35%

**Tabla 3.3** Fluctuaciones de potencia incluidas dentro de los intervalos [-1%, 1%], [-5%, 5%], [-10%, 10%] y [-15%, 15%] en Barásoain.

Como se observa en la Tabla 3.3, prácticamente el 90% de las fluctuaciones de potencia eléctrica que se producen se halla dentro del rango  $\pm 5\%$ . Cuando ampliamos el espectro hasta el  $\pm 10\%$  se llega a abarcar casi el 98% de los eventos. Esto se debe al efecto de agregación del parque, tal y como se demuestra más adelante en el apartado 3.1.3.

Por tanto, parece evidente que cualquier intento de absorber fluctuaciones por encima de estos valores resultará carente de sentido, pues el sistema de almacenamiento apenas requerirá de intervenir. Cabe destacar, además, que ciertas fluctuaciones abruptas que puedan encontrarse en rangos fuera del  $\pm 35\%$  se deben en su mayoría a huecos en la lectura de datos, desconexiones instantáneas del parque o a otras situaciones anómalas que sin embargo no perturban el análisis global y que, a efectos prácticos del dimensionamiento del sistema de almacenamiento, no se tienen en consideración.

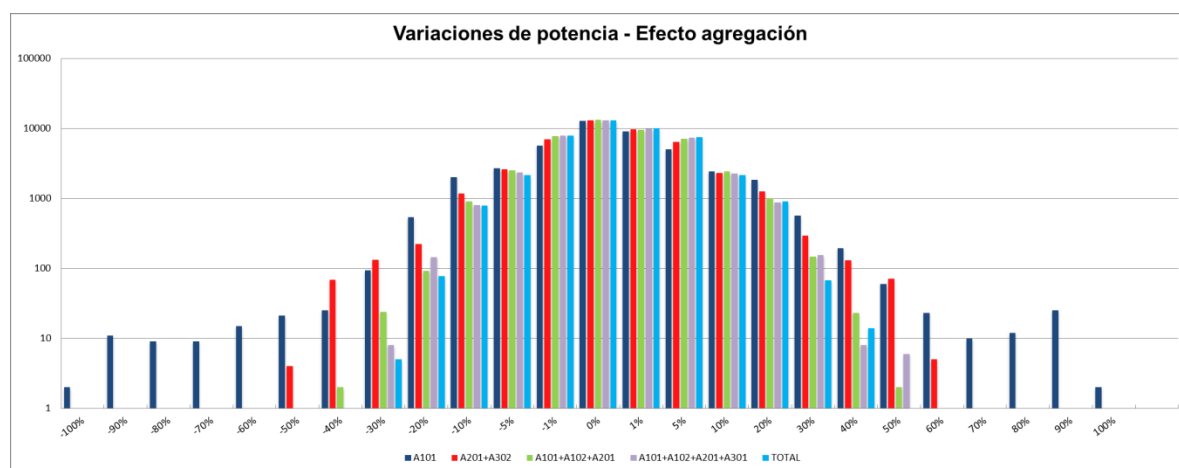
### 3.1.3 Efecto de agregación en el parque de Barásoain

Con el fin de determinar cuál es la configuración más apropiada para la absorción de las fluctuaciones de potencia eléctrica en el parque de Barásoain, se añade a esta investigación la consideración del efecto de agregación (*smoothing effect*) que se produce en él. Para ello se recogen datos minutales a lo largo de un mes, desde el 01/05/2013 a las 00:00:00 hasta el 31/05/2013 a las 23:59:00. Los datos corresponden a la potencia eléctrica inyectada a la red en esas fechas por una máquina, por 2, por 3, por 4 y para concluir por el parque completo.

El histograma derivado de este estudio se muestra en la Tabla 3.4 y en la Ilustración 3.4.

	A101		A201+A302		A101+A102+A201		A101+A102+A201+A301		TOTAL	
	Frecuencia	% acumulado	Frecuencia	% acumulado	Frecuencia	% acumulado	Frecuencia	% acumulado	Frecuencia	% acumulado
$x \leq -100\%$	2	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
$-100\% < x \leq -95\%$	5	0,02%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
$-95\% < x \leq -90\%$	6	0,03%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
$-90\% < x \leq -85\%$	7	0,04%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
$-85\% < x \leq -80\%$	2	0,05%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
$-80\% < x \leq -75\%$	5	0,06%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
$-75\% < x \leq -70\%$	4	0,07%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
$-70\% < x \leq -65\%$	7	0,09%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
$-65\% < x \leq -60\%$	8	0,10%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
$-60\% < x \leq -55\%$	9	0,12%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
$-55\% < x \leq -50\%$	12	0,15%	4	0,01%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
$-50\% < x \leq -45\%$	10	0,17%	24	0,06%	1	0,00%	1	0,00%	0	0,00%
$-45\% < x \leq -40\%$	15	0,21%	45	0,16%	1	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
$-40\% < x \leq -35\%$	31	0,28%	61	0,30%	3	0,01%	4	0,01%	1	0,00%
$-35\% < x \leq -30\%$	62	0,41%	71	0,46%	21	0,06%	4	0,02%	4	0,01%
$-30\% < x \leq -25\%$	197	0,86%	96	0,67%	26	0,12%	24	0,07%	19	0,05%
$-25\% < x \leq -20\%$	342	1,62%	127	0,96%	66	0,26%	121	0,34%	58	0,18%
$-20\% < x \leq -15\%$	727	3,25%	299	1,63%	210	0,73%	194	0,78%	232	0,70%
$-15\% < x \leq -10\%$	1289	6,14%	873	3,58%	689	2,28%	601	2,13%	560	1,96%
$-10\% < x \leq -5\%$	2668	12,11%	2604	9,42%	2511	7,90%	2335	7,36%	2163	6,80%
$-5\% < x \leq -1\%$	5686	24,85%	6936	24,96%	7700	25,15%	7824	24,88%	7911	24,53%
$-1\% < x \leq 0\%$	12780	53,48%	13000	54,08%	13184	54,69%	13071	54,17%	12957	53,55%
0%	1500	56,84%	349	54,86%	16	54,72%	29	54,23%	28	53,61%
$0\% < x \leq 1\%$	9072	77,17%	9671	76,53%	9577	76,18%	9761	76,10%	10060	76,15%
$1\% < x \leq 5\%$	5046	88,47%	6408	90,88%	7052	91,98%	7384	92,64%	7521	93,00%
$5\% < x \leq 10\%$	2432	93,92%	2315	96,07%	2407	97,37%	2244	97,67%	2141	97,80%
$10\% < x \leq 15\%$	1168	96,53%	902	98,09%	765	99,08%	607	99,03%	629	99,20%
$15\% < x \leq 20\%$	656	98,00%	353	98,88%	236	99,61%	266	99,62%	273	99,82%
$20\% < x \leq 25\%$	357	98,80%	178	99,28%	89	99,81%	134	99,92%	49	99,93%
$25\% < x \leq 30\%$	207	99,27%	116	99,54%	59	99,94%	20	99,97%	18	99,97%
$30\% < x \leq 35\%$	105	99,50%	63	99,68%	19	99,98%	5	99,98%	11	99,99%
$35\% < x \leq 40\%$	90	99,70%	67	99,83%	4	99,99%	3	99,98%	3	100,00%
$40\% < x \leq 45\%$	37	99,79%	67	99,98%	1	100,00%	5	100,00%	0	100,00%
$45\% < x \leq 50\%$	23	99,84%	4	99,99%	1	100,00%	1	100,00%	1	100,00%
$50\% < x \leq 55\%$	16	99,87%	2	99,99%	0	100,00%	1	100,00%	0	100,00%
$55\% < x \leq 60\%$	7	99,89%	3	100,00%	0	100,00%	0	100,00%	0	100,00%
$60\% < x \leq 65\%$	5	99,90%	1	100,00%	0	100,00%	0	100,00%	0	100,00%
$65\% < x \leq 70\%$	5	99,91%	0	100,00%	1	100,00%	0	100,00%	0	100,00%
$70\% < x \leq 75\%$	4	99,92%	0	100,00%	0	100,00%	0	100,00%	0	100,00%
$75\% < x \leq 80\%$	8	99,94%	0	100,00%	0	100,00%	0	100,00%	0	100,00%
$80\% < x \leq 85\%$	14	99,97%	0	100,00%	0	100,00%	0	100,00%	0	100,00%
$85\% < x \leq 90\%$	11	100,00%	0	100,00%	0	100,00%	0	100,00%	0	100,00%
$90\% < x \leq 95\%$	2	100,00%	0	100,00%	0	100,00%	0	100,00%	0	100,00%
$95\% < x \leq 100\%$	0	100,00%	0	100,00%	0	100,00%	0	100,00%	0	100,00%
$x > 100\%$	0	100,00%	0	100,00%	0	100,00%	0	100,00%	0	100,00%

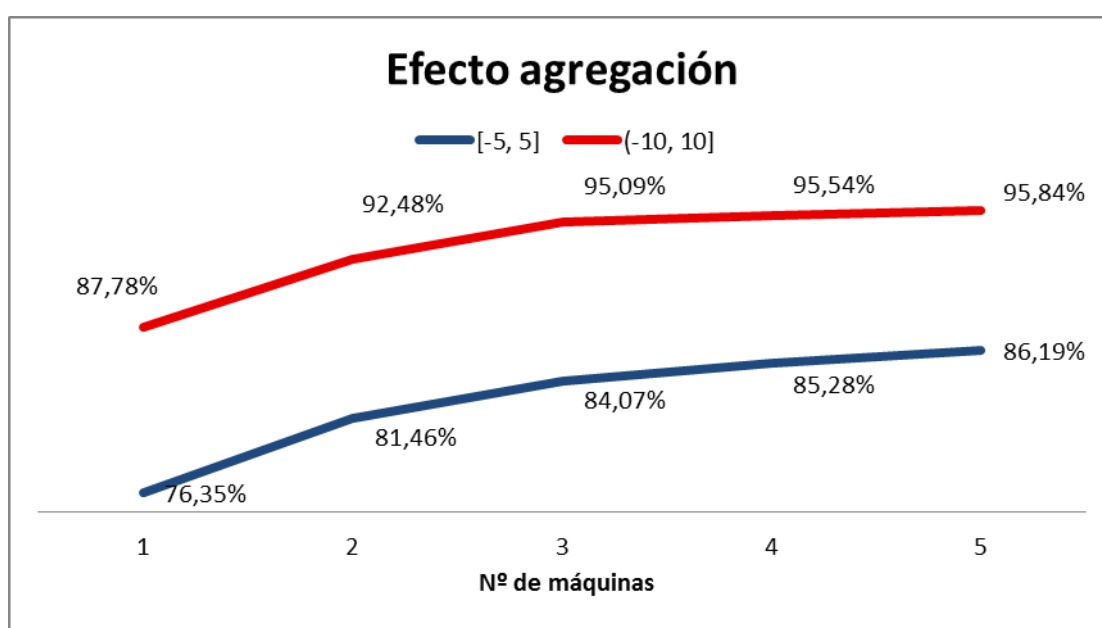
**Tabla 3.4** Histograma efecto de agregación en parque Barásoain.



**Ilustración 3.4** Histograma efecto de agregación en parque Barásoain.

Se observa claramente cómo cuanto mayor es el número de máquinas que funcionan en el parque, la campana de fluctuaciones en la potencia va estrechándose. Este efecto tiene su lógica, ya que, por ejemplo, cuando una máquina caiga, si existen otras en funcionamiento la variación de potencia ya no será del 100%, sino que quedará asimilada por las turbinas vecinas. De este modo, ya solamente con el mero hecho de incluir una segunda máquina los datos derivados de situaciones anómalas tienden en muchos casos a desaparecer, como se aprecia en la Ilustración 3.5.

Ahora bien, al considerar las cifras estimadas en las mediciones se aprecia también cómo el estrechamiento de esa campana no es continuo: no necesariamente cuanto mayor sea el número de turbinas la absorción de las fluctuaciones mejora de manera lineal. Dicho de otro modo, existe cierto comportamiento asintótico en el efecto de agregación del parque. Para comprobar esta tendencia a estabilizarse, se computa el porcentaje de fluctuaciones que van incluyéndose dentro de los intervalos  $[-5, 5]$  y  $[-10, 10]$ . El resultado de este estudio aparece en la Ilustración 3.5 y confirma la veracidad de la suposición.



**Ilustración 3.5** Comportamiento asintótico del efecto de agregación en parque eólico Barásoain.

Este es un dato de importancia, ya que informa de que no por el hecho de incluir un amplio número de máquinas en el parque va a resultar del todo innecesaria la inclusión de un sistema de almacenamiento para mejorar las prestaciones del mismo. Por el contrario, a partir de un número de máquinas relativamente pequeño el hecho de incluir más turbinas no desembocará en una mejora consistente en las fluctuaciones de potencia.

### 3.2 Escenarios de turbina y parque

El primer escollo a superar consiste en descubrir qué configuración global resulta más eficiente para el control de las fluctuaciones en la potencia del parque. Las posibilidades que aquí se estudian se limitan a los dos casos más extremos: en uno, la colocación de una batería para gestionar la potencia que genera cada turbina del parque y en el otro, el estudio global de la instalación, que consiste en gestionar la potencia generada por el parque conjunto en su totalidad con una sola batería. Confrontar los dos estudios permite deducir cuál de estas dos estrategias aportará más beneficios.

Por consiguiente, la estrategia seguida en este PFC consiste en estudiar ambos casos de forma totalmente autónoma y optimizar el sistema para cada uno de ellos. A continuación, se efectúa una comparación y se decide cuál es la configuración más adecuada. Según el estudio que mide el efecto de agregación en el parque de Barásoain, cabe presumir que una estrategia global, de la totalidad del parque, será más eficiente de forma relativa, ya que el sistema no necesitará responder por aquellas fluctuaciones de potencia elevadas, comprendidas en los rangos superiores al  $\pm 50\%$ , que ya se han asumido entre sí por las máquinas.

## 4. FUNCIONES DE CONTROL

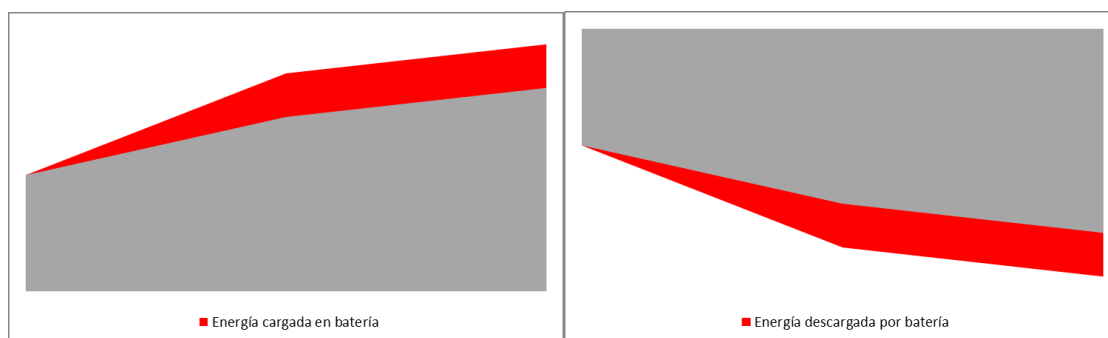
La primera fase del proyecto consiste en diseñar, implementar y optimizar las estrategias de control del sistema de almacenamiento de energía. Existen diferentes características de la potencia eléctrica generada por las turbinas eólicas que podrían controlarse y someter a una gestión más efectiva mediante el uso de un sistema de almacenamiento de energía y predicción. En el caso de este Proyecto Fin de Carrera los algoritmos desarrollados se centran en:

- el control de rampas (*ramp rate control*)
- el suavizado de la curva de potencia mediante un filtro de primer orden
- el aseguramiento de potencia, o *firming*.

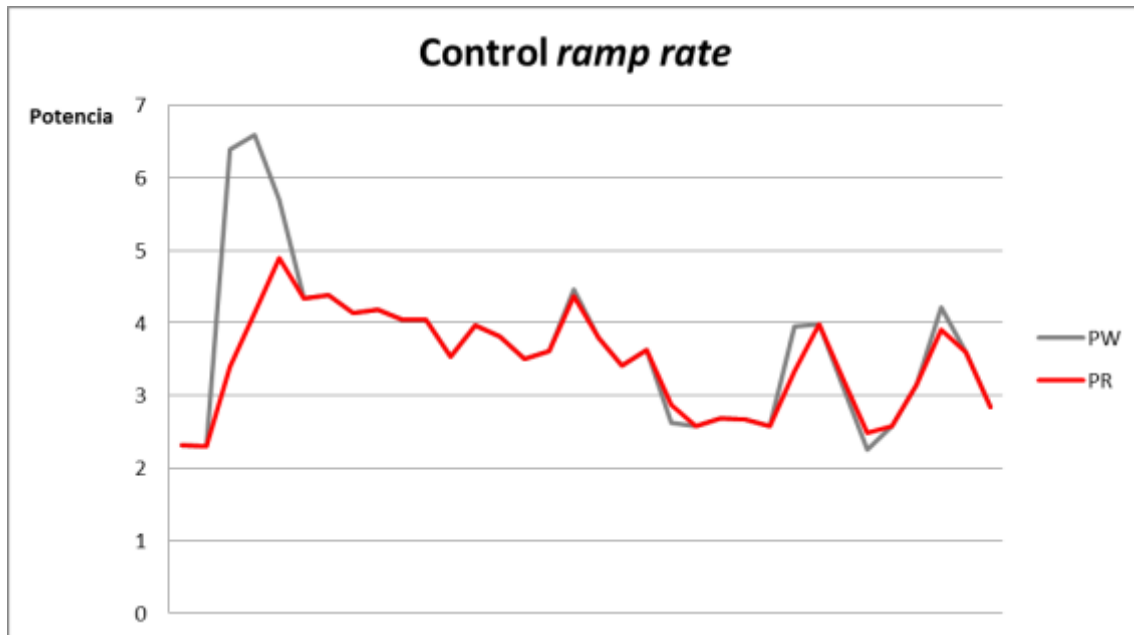
### 4.1 Control de rampas

Dentro de una función discreta de potencia, se define “evento de rampa” como el evento de cambio en la potencia en todo intervalo de tiempo. El ratio de un evento de rampa se denomina ratio de rampa (*ramp rate* en inglés) y se describe como la diferencia de potencia entre un minuto y el anterior, por lo que sus unidades de medida son MW/min.

Un sistema de almacenamiento puede reducir el *ramp rate* de la potencia eléctrica generada mediante procesos de carga y descarga. De este modo, tal como muestra la Ilustración 4.1, puede llegarse a aplicar un *ramp rate* preestablecido o deseado (área gris de la imagen) cuando en realidad la máquina podría inyectar únicamente un *ramp rate* mayor. El área roja constituye la energía que trasiega la batería en cada una de las dos operaciones.



**Ilustración 4.1** Corrección del ramp-rate mediante procesos de carga y descarga del almacenamiento



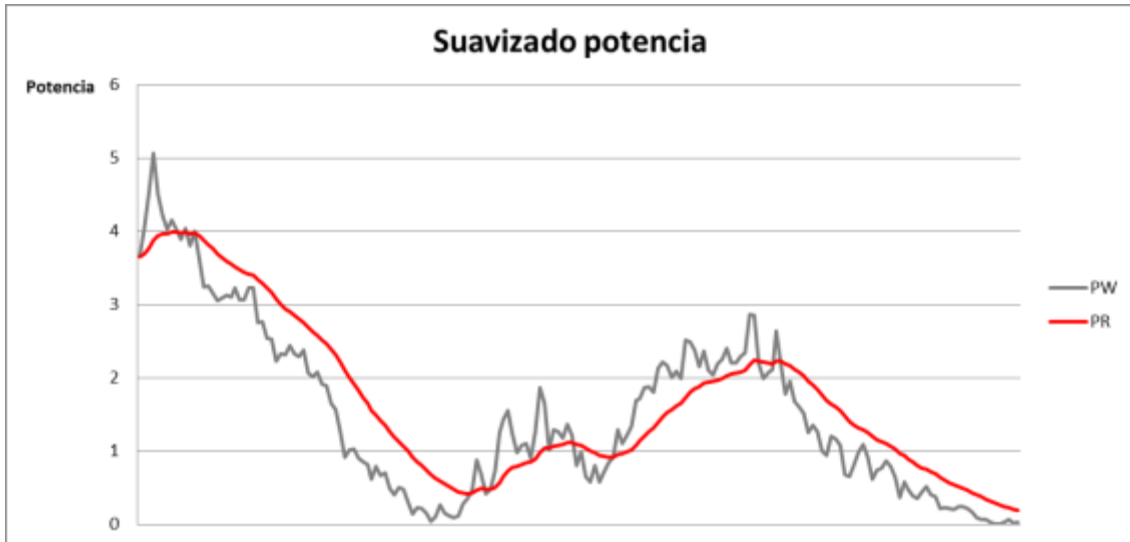
**Ilustración 4.2** Corrección de la curva de potencia inyectada a red mediante el control de rampas.

Según lo analizado en el estudio de las fluctuaciones del parque, los estudios se centran en la absorción de aquellas rampas superiores al 5% de la potencia nominal.

#### 4.2 Filtrado de fluctuaciones

El filtraje consiste en el suavizado de la potencia inyectada en la red basándose en el uso de un filtro paso bajo de primer orden, cuyo efecto se traduce en un aumento o disminución de la potencia eólica inyectada a red por medio del uso del sistema de almacenamiento. Resulta, en definitiva, un filtrado de aquellas frecuencias elevadas de la curva de potencia inyectada.

Resulta obvio que esto implica un mayor esfuerzo por parte de la batería, ya que no entra a funcionar únicamente cuando no se cumple el mínimo de fluctuación permitida, sino que actúa en todo momento. Por tanto, es de esperar que se produzcan un mayor número de ciclos de carga y descarga, aunque con una profundidad menor.

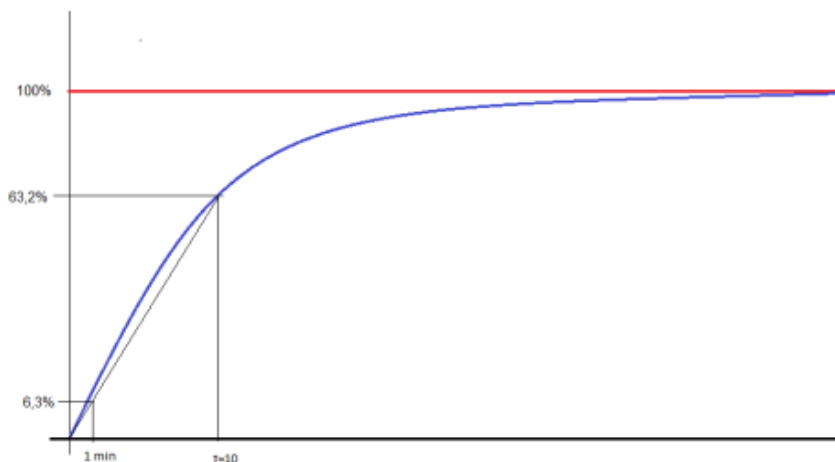


**Ilustración 4.3** Suavizado de la curva de potencia aplicando el concepto de filtro de paso bajo con un sistema de almacenamiento.

La expresión que rige el sistema de filtro de primer orden es la que sigue (4.1):

$$P_{R,k} = \frac{\tau}{\tau + \Delta t} \cdot P_{R,k-1} + \frac{\Delta t}{\tau + \Delta t} \cdot P_{W,k} \quad (4.1)$$

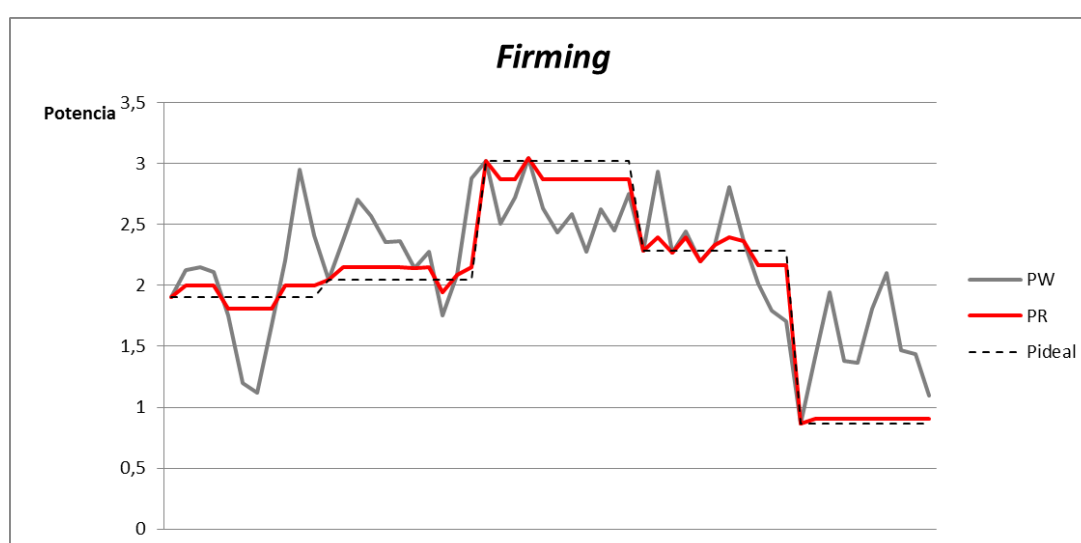
Existe cierta similitud entre el filtrado de primer orden y un control de rampa. La constante de tiempo o estatismo del sistema de filtrado,  $\tau$ , constituye el tiempo necesario para que la señal llegue al 63,2% del valor total del escalón. Por tanto, si se aplica una  $\tau=10$  minutos, ante un escalón del 100% de la potencia nominal, significa que a los 10 minutos la curva estará al 63,2% de la potencia nominal. Si trazamos una aproximación lineal y calculamos el porcentaje correspondiente, podríamos aproximar una  $\tau=10$  min a un *ramp rate* del 6,3% de la potencia nominal.



**Ilustración 4.4** Aproximación del concepto de filtrado a un control del ramp rate.

### 4.3 Firming de potencia

El escenario de aseguramiento de potencia, o *firming*, consiste en asegurar, mediante un sistema de almacenamiento de energía, que la potencia inyectada en la red no se desvíe respecto a un valor concreto durante un período de tiempo preestablecido, permitiéndose un umbral de desviación respecto a dicha potencia. Si la diferencia entre la potencia objetivo y la generación eólica supera este límite, se procede a cargar o descargar el sistema de almacenamiento de energía con el fin de alcanzar el requerimiento. De esta forma, la nueva curva de potencia inyectada es prácticamente plana durante el intervalo establecido, como se aprecia en la Ilustración 4.5.



**Ilustración 4.5** Curva de aseguramiento de potencia mediante un sistema de almacenamiento.

En el caso de este estudio, la potencia que se erige como referencia a asegurar se toma de la potencia generada por la turbina en el punto de medición concreto. Si se estipula por ejemplo que el aseguramiento de potencia ha de mantenerse durante diez minutos, cada diez minutos se evaluará la potencia a la salida del aerogenerador, y será ese el valor al que el sistema deba procurar ceñirse durante los diez minutos siguientes, cuando se realizará una nueva medición.

La ecuación que rige el cálculo de la potencia a inyectar en la red en cada instante es la (4.2):

$$P_{red_k}^{k+T_p} = P_{wind_k} \pm P_{umbral_k} \quad (4.2)$$



## 5. NOVEDADES INTRODUCIDAS EN EL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA (ESS)

A lo largo de este Proyecto Fin de Carrera se ha considerado, como sistema de almacenamiento de energía, el caso particular de una batería con tecnología de Li-ion. Durante el proceso, se ha estudiado el influjo que pudieran producir diversas estrategias de control en el comportamiento y duración de la batería, así como en la reducción de las fluctuaciones en la potencia inyectada a la red.

### 5.1 Banda superior y banda inferior

Con la finalidad de alcanzar un mejor uso de la batería y prolongar su vida útil, y teniendo en cuenta las limitaciones de carga y descarga que habitualmente se presentan en las baterías de ion-litio – como la imposibilidad de descargarse por debajo del 20% de su capacidad – se ha introducido en los algoritmos de control una modulación del estado de carga de la batería (SOC, del inglés *State Of Charge*). En concepto, se trata de incluir unas bandas de regulación superior e inferior (que se pueden parametrizar dependiendo de las necesidades de la simulación) en las que el algoritmo regulará la potencia de carga o descarga que permitirá utilizar a la batería.

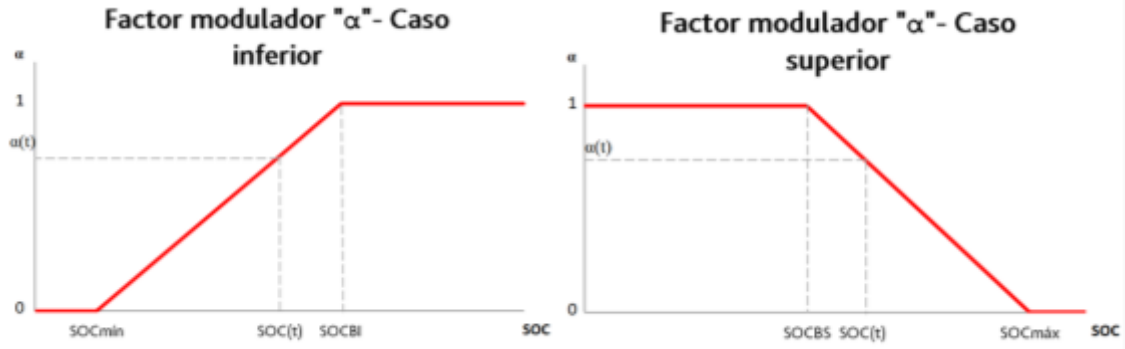


**Ilustración 5.1** Concepto de bandas de control en el estado de carga de la batería.

En el caso de que el SOC de la batería discorra dentro de estas bandas, se aplica una limitación de la potencia de la batería para evitar así que el almacenamiento se aproxime a situaciones de carga o descarga extremas, lo cual incurriría a largo plazo en perjuicios para la batería. Así, en el supuesto en que para absorber un *ramp rate* elevado la batería necesite cargarse y que a la vez se halle dentro de la banda superior, entra en juego un factor modulador,  $\alpha$ .

Este factor  $\alpha$  consiste en una función acotada entre los valores 0 y 1. Para el presente estudio, se ha diseñado como un parámetro lineal, tal como se especifica en la Ilustración 5.2 y en las ecuaciones (5.1) y (5.2). Sin embargo, se ha detectado como

posible mejora futura la creación de una función no lineal en la cual el factor modulador sea más exigente a medida que más próxima este la carga a los límite máximo o mínimo y más permisivo en caso contrario.



**Ilustración 5.2** Función moduladora de la carga según SOC

$$\alpha = \frac{SOC(t) - SOC_{\min}}{SOC_{BI} - SOC_{\min}} \quad (5.1)$$

$$\alpha = \frac{SOC_{\max} - SOC(t)}{SOC_{\max} - SOC_{BS}} \quad (5.2)$$

## 5.2 Concepto de predicción

Si un sistema de almacenamiento es capaz de predecir la tendencia a corto plazo de potencia eléctrica generada por el parque eólico, el sistema podrá ajustar de manera inteligente el estado de carga del almacenamiento en previsión de albergar variaciones de potencia muy severas, a la par que minimiza el número de violaciones de las restricciones.

Como las simulaciones se han llevado a cabo con datos reales de potencia ya inyectada en fechas pasadas, se ha definido como predicción para cada instante de tiempo a la media de una serie de valores futuros a los que se ha aplicado un ruido.

$$Pred(i) = \sum_{j=i}^{i+n} P_w(j) + r(t) \quad (5.3)$$

Sin embargo, existen estudios (Duehee Lee, Joonhyun Kim y Ross Baldick, *“Ramp Rate Control of Wind Power Output Using a Storage System and Gaussian Processes”*, 7 septiembre 2012) donde se sostiene que la forma más precisa de predecir el output de un parque eólico es a través de procesos gaussianos. Esta afirmación se basa en la suposición de que el patrón que sigue el segmento de potencia actual coincidirá con los patrones de segmentos de potencia históricos. Este aspecto puede constituir una línea susceptible de estudio en profundizaciones futuras.

### 5.3 Limitación por debajo del 20% $P_n$

Cuando la capacidad generadora de una planta se encuentra en niveles de potencia bajos, algunos códigos de red exigen de cumplir ciertos requerimientos. Es decir, probablemente en el momento en el que una central no inyecta mucha potencia a la red, esta no tiene por qué tener los mismos requisitos de calidad que cuando inyecta mucho. Se ha estimado que este límite ronda el 20% de la potencia nominal.

Por tanto, se ha incluido un nuevo parámetro a los algoritmos de control para que en dicha situación la batería no trabaje. Se considera que no sería lógico someter a un estrés extra al sistema de almacenamiento para pulir la potencia a inyectar si el gestor de la red no va a requerir exigencias de calidad. Si bien es cierto que, en ocasiones, podría sacarse ventaja de esta circunstancia para cargar la batería si esta estuviera en un estado de carga bajo y la predicción así lo estimara oportuno, no se ha implementado dicha posibilidad en el estudio de este Proyecto Fin de Carrera.

Otro aspecto que pudiera dar sentido a este parámetro y a que la batería no trabaje a bajas potencias se sustrae de la curva de potencia teórica del aerogenerador. Como se ha explicado en la Ilustración 1.2, en el rango de velocidades más bajas, el impacto de las variaciones de la velocidad del viento es de menor repercusión en la potencia que genera la turbina. Por tanto, puede esperarse que las variaciones de potencia en rangos bajos sean menores.

## 6. DESCRIPCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS EMPLEADAS

### 6.1 ADOSA

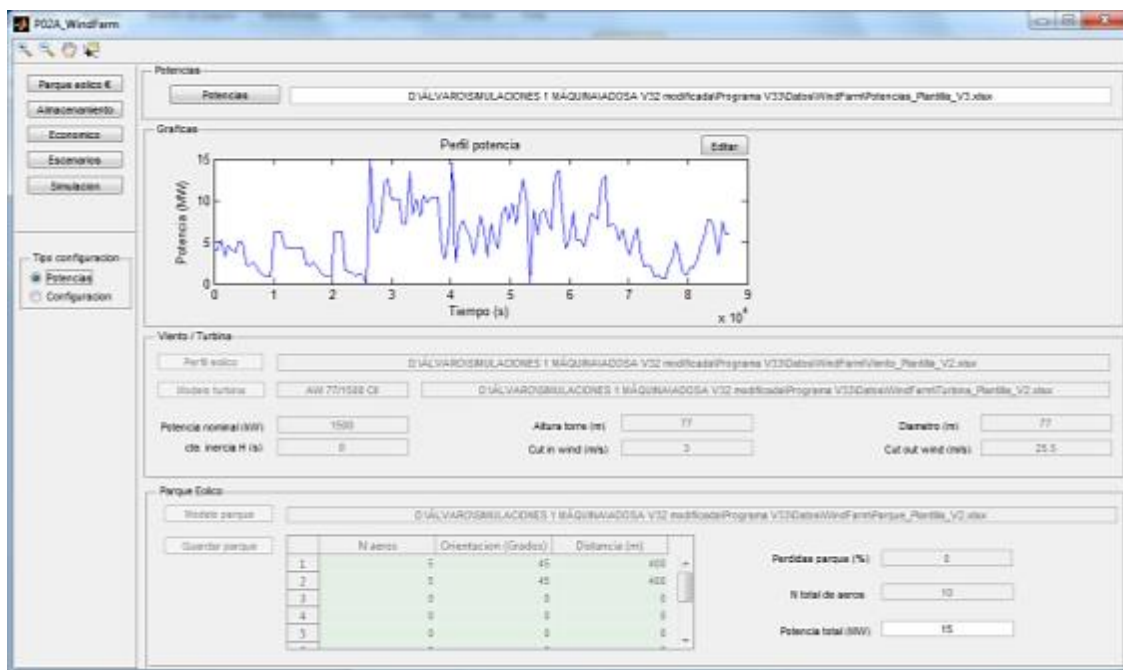
ADOSA (Análisis, Dimensionamiento y Optimización de Sistemas de Almacenamiento) es una aplicación informática basada en el lenguaje de programación Matlab, desarrollada por Acciona Energía con el apoyo de Tecnalia. Se trata de un software de simulación de escenarios de almacenamiento energético, dentro del cual se encuentran implementados los algoritmos y estrategias de control, y que resulta ser el eje central de este Proyecto Final de Carrera, tanto por las mejoras que se han ido introduciendo paulatinamente dentro de su código de programación como por constituir el elemento con el cual se han ejecutado todas las simulaciones necesarias para realizar este estudio.



**Ilustración 6.1** Imagen de portada de la aplicación ADOSA

El procedimiento para recrear la simulación respeta estas fases o pasos:

1. Introducir los datos de entrada del parque eólico donde quiere estudiarse el uso de un sistema de almacenamiento. Pueden cargarse directamente los datos de potencia generados (como se hace en el caso de este PFC) o introducir la configuración del parque y que el propio sistema estime las potencias que generaría el parque en cuestión a partir de los datos del viento.



**Ilustración 6.2** Pantalla de introducción de datos del parque eólico sobre el que implementar almacenamiento de ADOSA.

2. A continuación se introducen las características del almacenamiento: eficiencias, capacidad, potencias de carga y descarga, años de vida, ramp-rate, bandas, etc.



**Ilustración 6.3** Pantalla de configuración del sistema de almacenamiento de ADOSA.

3. Existe también la posibilidad de añadir parámetros económicos, de penalizaciones por incumplimiento y costes que no son objeto de este Proyecto final de Carrera.

**Parametros de análisis:**

Periodo de análisis (años): 20 Vida Parque

Inflación (%): 2

Tasa de descuento (%): 3

**Financiación:**

Porcentaje financiado (%): 90

Periodo de amortización (años): 10

Interés (%): 3

**Impuestos y seguros:**

Ingreso sobre venta (%): 15

Ingreso sobre beneficio (%): 5

Seguros (%): 2

**Incentivos:**

Incentivo a la Producción (€/MWh): 2

**Precio de la energía:**

Precio (€/MWh): 20

Tasa de aumento (%): 5

Parámetro tarifa (%):

**Paramétrica:**

Modelo precio: D:\ALVARO\SIMULACIONES\1\BAGUIBAUDOSA V32 modificado\Programa V32\Datos\economico\Predictiva\_Parilla\_V2.xls Guardar precios

Tarifa (€/MWh)	Lunes, martes, miércoles, jueves, viernes	Sábado, domingo
1	43.00	43.00
2	45.00	45.00
3	47.00	47.00
4	49.00	49.00
5	51.00	51.00
6	53.00	53.00
7	55.00	55.00
8	57.00	57.00
9	59.00	59.00

**Ilustración 6.4** Pantalla del apartado económico del software ADOSA.

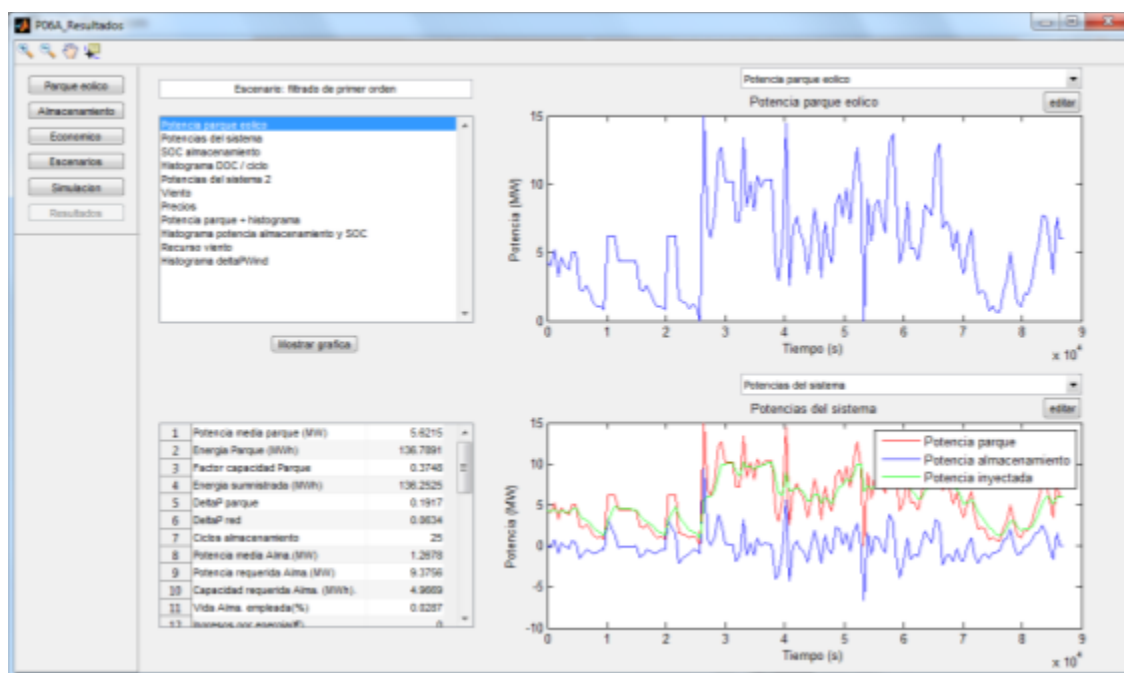
4. Por último, se selecciona el escenario que quiere simularse. En este apartado será donde se agreguen las limitaciones que se quieren cumplir con ayuda del almacenamiento en parámetros numéricos: *ramp-rate* de potencia, filtrado, *firmiting*, etc.

The screenshot shows the 'Parque eólico' configuration window in the H2A software. The window is divided into several sections:

- Selección de escenarios:** A dropdown menu showing the selected scenario 'Parque eólico'.
- Configuración de escenario:** A section with checkboxes for 'Escenario seleccionado' and 'Escenario seleccionado'.
- Parque eólico:** A section with a list of scenarios: 'Parque eólico', 'Filtro de primer orden', 'Limitación de rampas', 'Regulación de frecuencia', 'Firming de potencia eólica', 'Restricciones de red', 'Venta optimizada de energía', 'Firming de Potencia eólica + Venta optimizada de energía', 'Regulación de frecuencia + Venta optimizada de energía', and 'Regulación de frecuencia + Firming de Potencia eólica'.
- Paramétrica:** A section with various input fields for parameters:
  - ☐ Filtro de primer orden: Price per suavizado (€/MWh)
  - ☐ Limitación de rampas: Lim sup rampa (MW/hr), Lim inf rampa (MW/hr), Price per atenuación (€/MWh)
  - ☐ Regulación de frecuencia: Frecuencia nominal (Hz), Dead band (Hz), Remuneración por potencia (€/MWh), Frecuencia del sistema, Remuneración por energía (€/MWh)
  - ☐ Firming de potencia eólica: Objetivo Firming en base a (Generación eólica, Inyección a red), Periodo predicción (s), Desviación máxima (%), Penalización por desvío (€/MWh)
  - ☐ Restricciones de red: Límite Ija (MW), Perfil de evaluación, Umbral de desconexión (€/MWh), Perfil de evaluación, Umbral de venta (€/MWh)
  - ☐ Venta optimizada de energía: Umbral de desconexión (€/MWh), Umbral de venta (€/MWh)
- Escenario:** A section with a list of scenarios: 'No paramétrica', 'Atenuación', 'Econ. general', 'Escenario', 'Econ. escenario', and 'Estadística'.

**Ilustración 6.5** Pantalla de elección de escenarios de la aplicación ADOSA.

Al cierre de la simulación aparece una pantalla con todos los resultados y las gráficas que pudieran derivarse de esos datos finales. En este Proyecto Final de Carrera, debido a la complejidad y dimensión de los cálculos, estas últimas gráficas se trazan con el *software* de Microsoft Excel, ya que por razones computacionales resulta imposible simular todo un año completo de manera continua, y es necesario hacer discurrir el proceso que se ha detallado distribuido por trimestres consecutivos.



**Ilustración 6.6** Pantalla de resultados de la aplicación ADOSA.

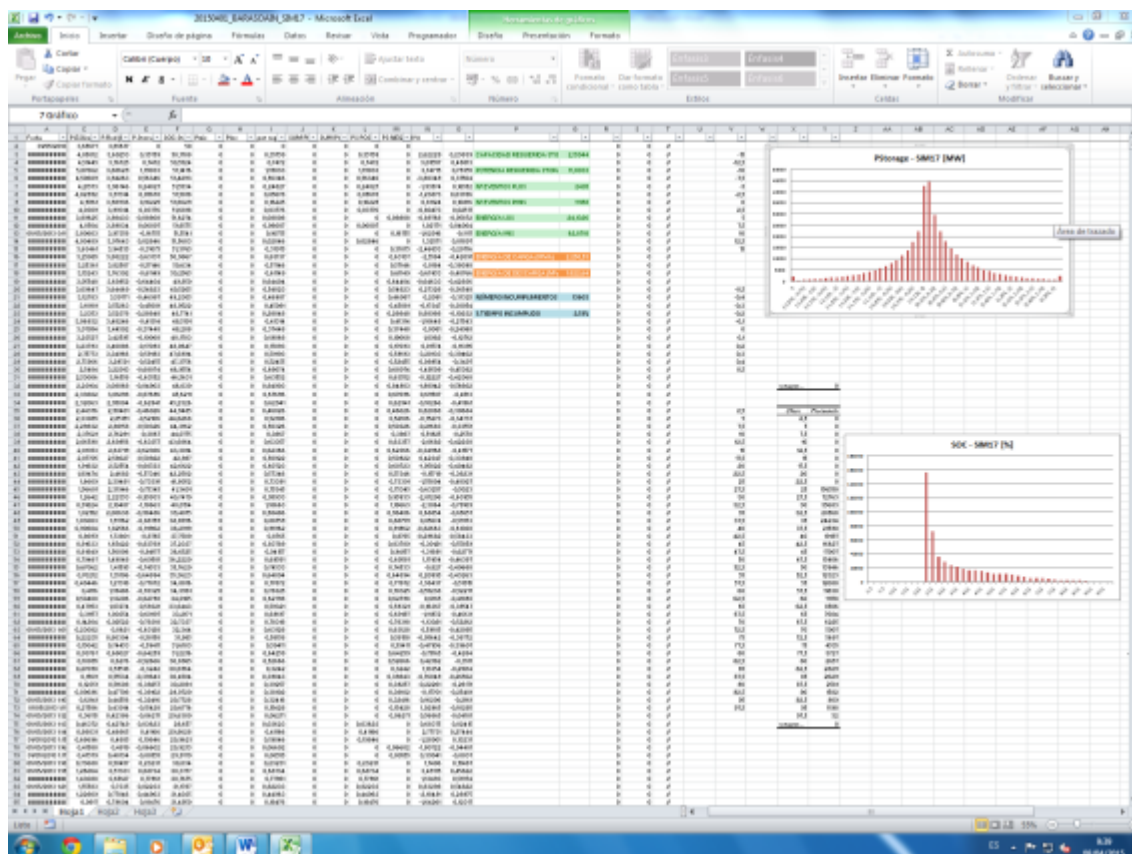
## 6.2 Matlab

Al ser ADOSA una aplicación desarrollada en el lenguaje de programación Matlab, ha sido necesario el uso de este programa para incorporar las continuas modificaciones que se han ido introduciendo en el código. De estas modificaciones realizadas en Matlab, van surgiendo de forma paulatina las nuevas versiones de la aplicación ADOSA.

## 6.3 Microsoft Excel

Se requiere la aplicación de Microsoft Excel para tratar y estudiar los resultados que se obtienen de cada una de las simulaciones. Así, según se muestra en la Ilustración 6.7, se resuelven cálculos de las capacidades requeridas y de la energía trasegada por la batería, el número y la magnitud de los incumplimientos que se han manifestado, se estudia la posible mejora en las fluctuaciones de potencia así como el trabajo que ha sufrido al batería en términos tanto de potencia como de energía.





**Ilustración 6.7** Detalle de parte de la plantilla creada en Microsoft Excel para el procesado de resultados.

## 6.4 PI DataLink Acciona

PI DataLink permite recopilar datos procedentes de un Sistema PI y extenderlos en una hoja cálculo de Microsoft Excel. Además, PI DataLink provee de una *interface* gráfica para recuperar datos y crear funciones y cálculos. Las funciones de DataLink están embebidas en las celdas de una hoja de cálculo y puede proporcionar actualizaciones constantes de mediciones procedentes del Servidor de PI.

Esta utilidad se ha empleado únicamente para recabar los datos medidos en el parque experimental de Barásoain y poder procesarlos en Excel, por un lado para introducirlos como dato de entrada en ADOSA y por otro para estudiar fluctuaciones y situaciones anómalas que se originan en el parque o en las mediciones.



## 7. RECOPIACIÓN Y PRESENTACIÓN DE LOS DATOS OBJETO DE ESTUDIO

Los datos objeto de estudio se obtienen mediante la herramienta PI Datalink de Acciona. A pesar de que el control de las máquinas y las mediciones necesarias para su correcto funcionamiento se realizan en periodos de tiempo que llegan hasta el segundo, el trasiego de información desde el parque hasta los servidores de Acciona Energía se produce de forma minutal, por lo que es este el intervalo elegido para el desarrollo del presente Proyecto Fin de Carrera.

La magnitud del intervalo de muestreo seleccionado tiene un gran impacto en el desarrollo del estudio ya que, como las variaciones de potencia se miden entre una medición y la anterior según la expresión (7.1), es evidentemente más probable que las variaciones de potencia sean mayores en intervalos de tiempo más elevados.

$$\Delta P|_{P_N} = [P(i) - P(i - 1)]/P_N \quad (7.1)$$

Estas fluctuaciones instantáneas de la potencia generada tienen posteriormente una fuerte repercusión en el desarrollo de las casuísticas a implementar, ya que es esto precisamente lo que se intentará controlar mediante el sistema de almacenamiento y de lo que dependerá en parte el perfeccionamiento de las nuevas estrategias operativas.

Así pues se selecciona el tiempo de muestreo igual a un minuto por las dos siguientes razones:

- Capacidad computacional: para ciertos cálculos se requiere de la herramienta Microsoft Excel que, en su versión más actualizada, tiene 1.048.576 filas máximas para realizar cálculos. Un año de simulación con un intervalo de muestreo de 15 segundos arrojaría 2.102.400 datos, por lo que invalida la posibilidad de acogerse a la herramienta de Excel en este caso (debiéndose añadir a esto el considerable aumento en los tiempos de cálculo en todos los programas que se implementen).
- Veracidad de los datos: La herramienta PI Datalink de Acciona obtiene los datos minutalmente, ya que las mediciones las formaliza con este período de muestreo. Por tanto, generar datos con una frecuencia mayor requeriría incluir interpolaciones que sesgarían la veracidad de los datos.

## 8. ALGORITMOS

Todo lo descrito hasta este punto constituye el análisis del escenario de partida sobre el que se fundamenta el grueso restante de este Proyecto Fin de Carrera. De aquí en adelante, se detalla el proceso llevado a cabo para estudiar las posibles mejoras, derivadas de las paulatinas modificaciones implantadas, que pudiera experimentar el sistema

Este proceso consta de tres partes claramente diferenciadas:

- Por un lado, la depuración y optimización de los algoritmos dentro de la aplicación ADOSA que rigen el comportamiento del sistema de almacenamiento. El fundamento de alguna de estas mejoras se explica en los capítulos 4 y 5. Sin embargo es este capítulo donde se profundiza en el detalle de los algoritmos.
- Por otro, la realización de las simulaciones que se detallan en el capítulo 9.
- Y, por último, la realización de estudios posteriores y análisis de los datos obtenidos con la herramienta de Microsoft Excel, cuyos resultados pueden verse distribuidos entre los distintos apartados del capítulo 9 y el capítulo 10.

En matemáticas, lógica, ciencias de la computación y disciplinas relacionadas, un algoritmo (del griego y latín, *dixit algorithmus* y este a su vez del matemático persa *Al-Juarismi*) es un conjunto prescrito de instrucciones o reglas bien definidas, ordenadas y finitas que permite realizar una actividad mediante pasos sucesivos para hallar la solución de un problema. Dados un estado inicial y una entrada, siguiendo los pasos sucesivos se llega a un estado final y se obtiene una solución.

Se han diseñado y depurado algoritmos para la ejecución de cada una de las diferentes estrategias simuladas. Los puntos extraídos minutalmente sirven como elemento de entrada de estos algoritmos y se realiza un proceso cíclico en el que cada dato de un minuto se analiza individualmente.

### Rampas

El algoritmo de regulación de rampas consta de cinco niveles y cuatro decisiones a tomar por parte del procesador. En la primera cota se encuentra la lectura de los datos de entrada y el cálculo de la potencia máxima y mínima entre las que deberá situarse la potencia inyectada a la red para cumplir el requerimiento de porcentaje de rampa impuesto, como se describe en las ecuaciones (8.1) y (8.2) respectivamente.

$$P_{m\acute{a}x}(i) = P_w(i) + Ramprate_+ \quad (8.1)$$

$$P_{m\acute{i}n}(i) = P_w(i) - Ramprate_- \quad (8.2)$$

A continuación se comprueba si la potencia que se podría inyectar en ese instante sin que el almacenamiento interfiera se encuentra en los niveles establecidos para cumplir el requerimiento de *ramp rate*. Tanto si la potencia generada se encuentra en la zona de cumplimiento como si no, el algoritmo pasa a la siguiente fase: el estudio del estado de carga. En este punto, tal como se muestra en la Ilustración 5.1, existen cinco diferentes opciones: SOC por debajo del mínimo, en la banda inferior, en la zona media, en la franja superior o superior al límite máximo.

En el cuarto estadio del proceso se procede a verificar la predicción de potencia. De este modo, en función de si prevemos potencias al alza o a la baja, y en conjunción con el estado de carga del almacenamiento comprobado en la fase anterior, se procede a realizar un tipo de control u otro. Por último, antes de ejecutar la acción de carga o descarga de la batería, hay que controlar que la potencia requerida no supere el límite del sistema de almacenamiento. Si se supera, se cargará o descargará solamente la potencia máxima y se incurrirá en un incumplimiento del *ramp rate*.

Al finalizar este proceso, se realizan los cálculos de las nuevas condiciones del sistema: potencia cargada o descargada ( $P_S$ ), potencia inyectada a la red ( $P_R$ ), magnitud del incumplimiento – en caso de que lo hubiera – tanto por exceso como por defecto ( $P_{inc}$ ), el nuevo estado de carga (SOC). Las ecuaciones que se utilizan para ello son las siguientes:

- En caso de carga de la batería:

$P_R$ : dependiente de caso

$P_S > 0$  (si la hubiera)

$$SOC(i) = SOC(i - 1) + P_S(i) \cdot \Delta t \cdot SNC \cdot \eta_c \quad (8.3)$$

$$SOC(i)[\%] = SOC(i - 1) + P_S(i) \cdot \Delta t \cdot SNC \cdot \eta_c \cdot 100$$

$P_{inc} > 0$  (si la hubiera)

- En caso de descarga de la batería:

$P_R$ : dependiente de caso

$P_S < 0$  (si la hubiera)

$$SOC(i) = SOC(i - 1) + P_S(i) \cdot \Delta t \cdot SNC / \eta_d \quad (8.4)$$

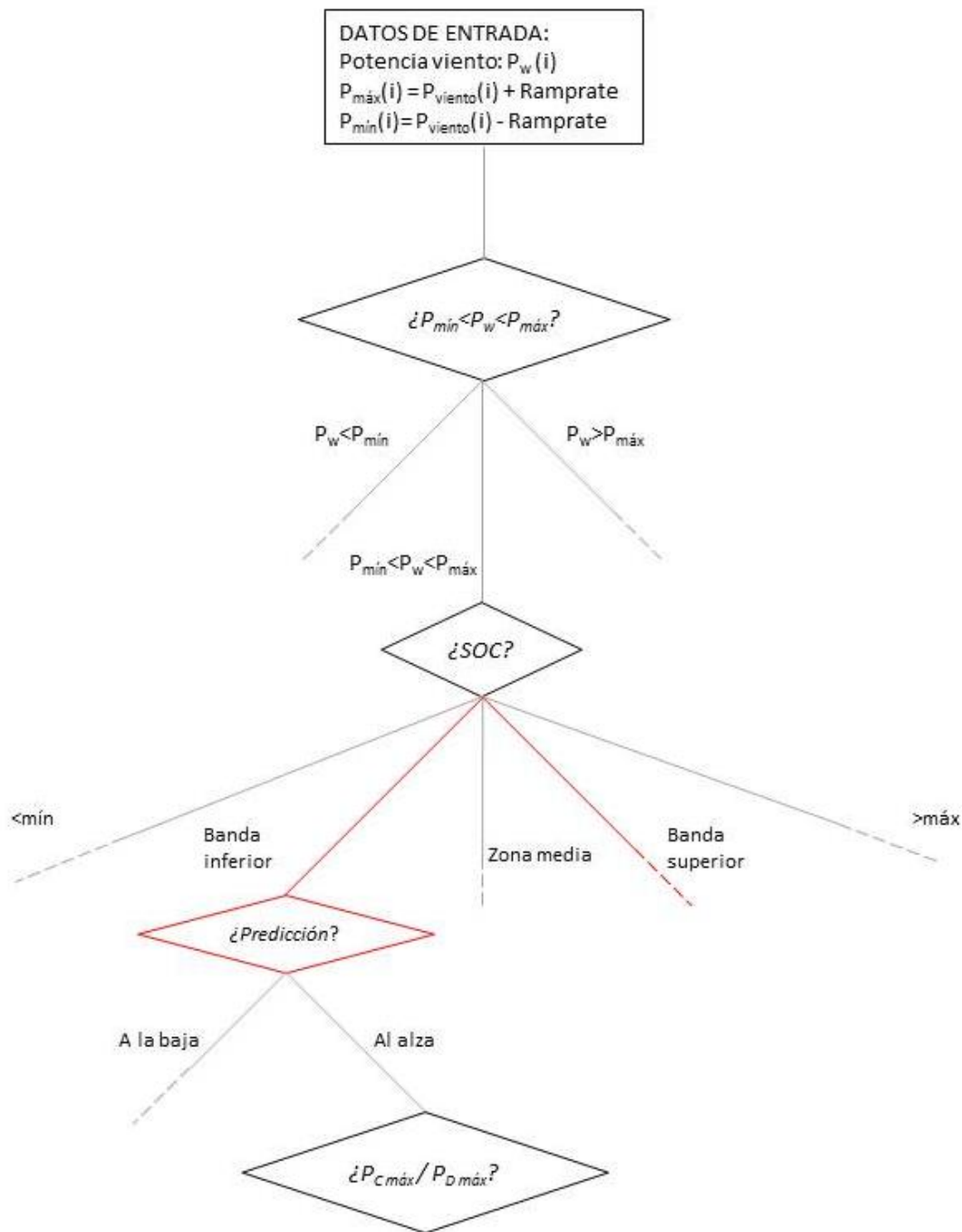
$$SOC(i)[\%] = SOC(i - 1) + P_S(i) \cdot \Delta t \cdot \frac{SNC}{\eta_d} \cdot 100$$

$P_{inc} < 0$  (si la hubiera)

Dado que este procedimiento desemboca en multitud de diferentes posibilidades, se han incorporado contadores de caso y magnitud de incumplimiento. Es decir, cada vez que se produzca una acción o un incumplimiento en un determinado muestreo, se recogerá información de la dimensión de la infracción y de la casuística que ha llevado al sistema a la situación de no poder absorber el *ramp rate* necesario.

Adicionalmente, se ha añadido la posibilidad de incorporar una limitación de potencia mínima por debajo de la cual la batería no entra en funcionamiento, tal como se ha comentado en el apartado 5.3. Esto constituye la incursión de un nuevo nivel en el algoritmo, que se implementa en el segundo nivel del guarismo, tal como se aprecia en la Ilustración 8.2.

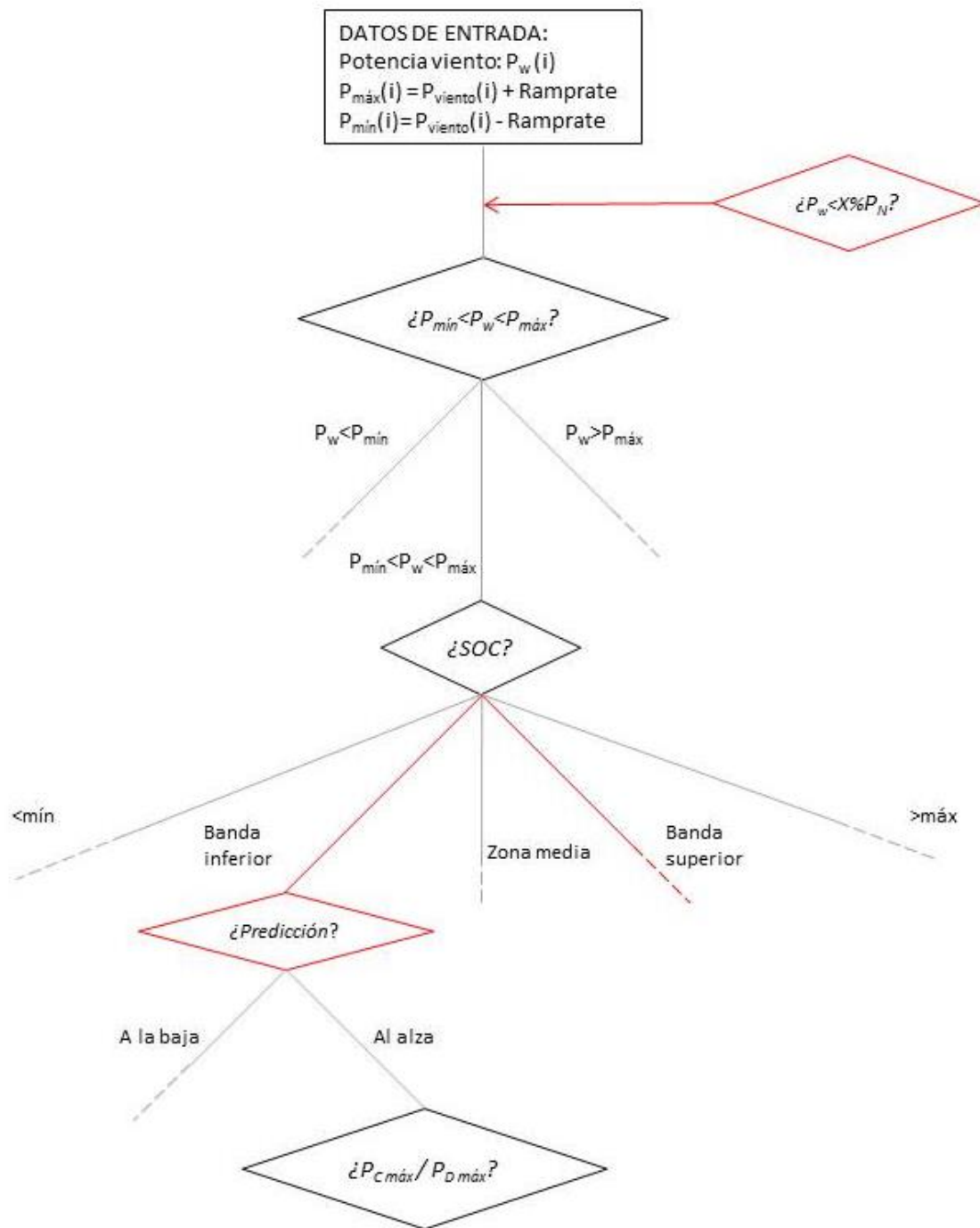
## ALGORITMO SIMPLIFICADO CONTROL *RAMP RATE*



 Conceptos novedosos

**Ilustración 8.1** Algoritmo simplificado control del *ramp rate* sin limitación de potencia mínima

### ALGORITMO SIMPLIFICADO CONTROL RAMP RATE



 *Conceptos novedosos*

**Ilustración 8.2** Algoritmo simplificado control del ramp rate con limitación de potencia mínima.

## Filtraje

En esencia, el algoritmo de filtraje guarda gran similitud con el de control de *ramp rate*. Su función es, como se ha descrito en el capítulo 4, suavizar la curva de potencia inyectada a la red, eliminando las altas frecuencias de variación. Consta igualmente de cinco niveles de decisión, ampliable a uno más en caso de introducir la limitación de mínima potencia.

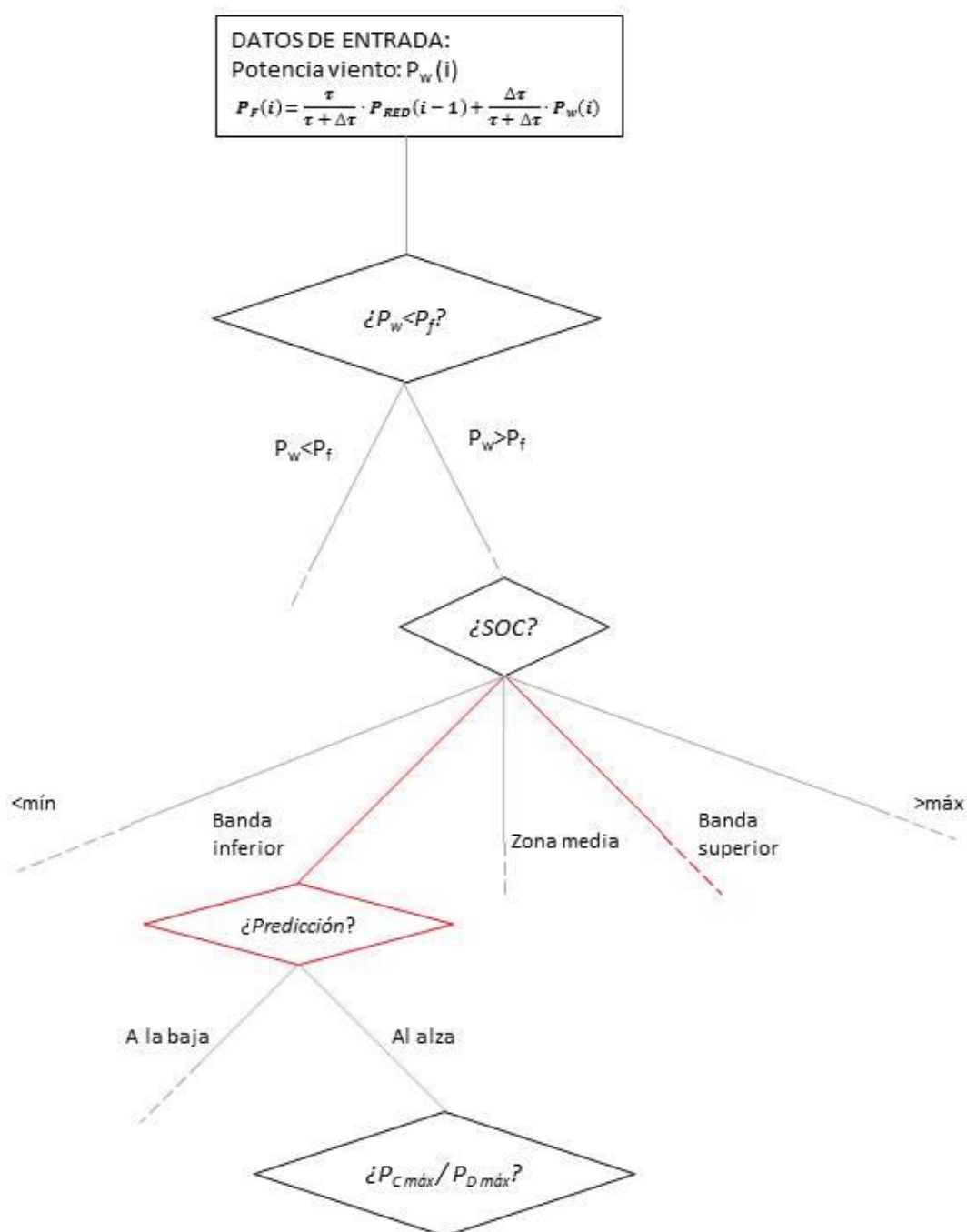
En el primer nivel, se realiza el cálculo de la potencia “filtrada”, en función del tiempo de estatismo que se haya considerado oportuno para la simulación en curso. Este cálculo se lleva a cabo a través de la ecuación (8.5).

$$P_F(i) = \frac{\tau}{\tau + \Delta\tau} \cdot P_{RED}(i - 1) + \frac{\Delta\tau}{\tau + \Delta\tau} \cdot P_w(i) \quad (8.5)$$

A partir de aquí, el algoritmo procura que la potencia que se inyecte a la red se asemeje lo máximo posible a la curva descrita por las sucesivas  $P_F$ . Esta aproximación se lleva a cabo en función de la situación en el punto dado, al igual que en el caso del *ramp rate*. Por tanto, se toman una serie de decisiones consecutivas dependiendo de la potencia que puede generar el aerogenerador sin que intervenga el almacenamiento, el estado de carga de la batería, la previsión de potencia a generar y si la potencia a cargar o descargar por la batería entra dentro de su funcionalidad.

Los cálculos a ejecutar al final del algoritmo son los mismos que los expresados en las ecuaciones (8.4) y (8.5), a excepción del cálculo de la potencia de incumplimiento, pues este concepto carece de sentido en el caso del suavizado de potencia.

## ALGORITMO SIMPLIFICADO FILTRAJE

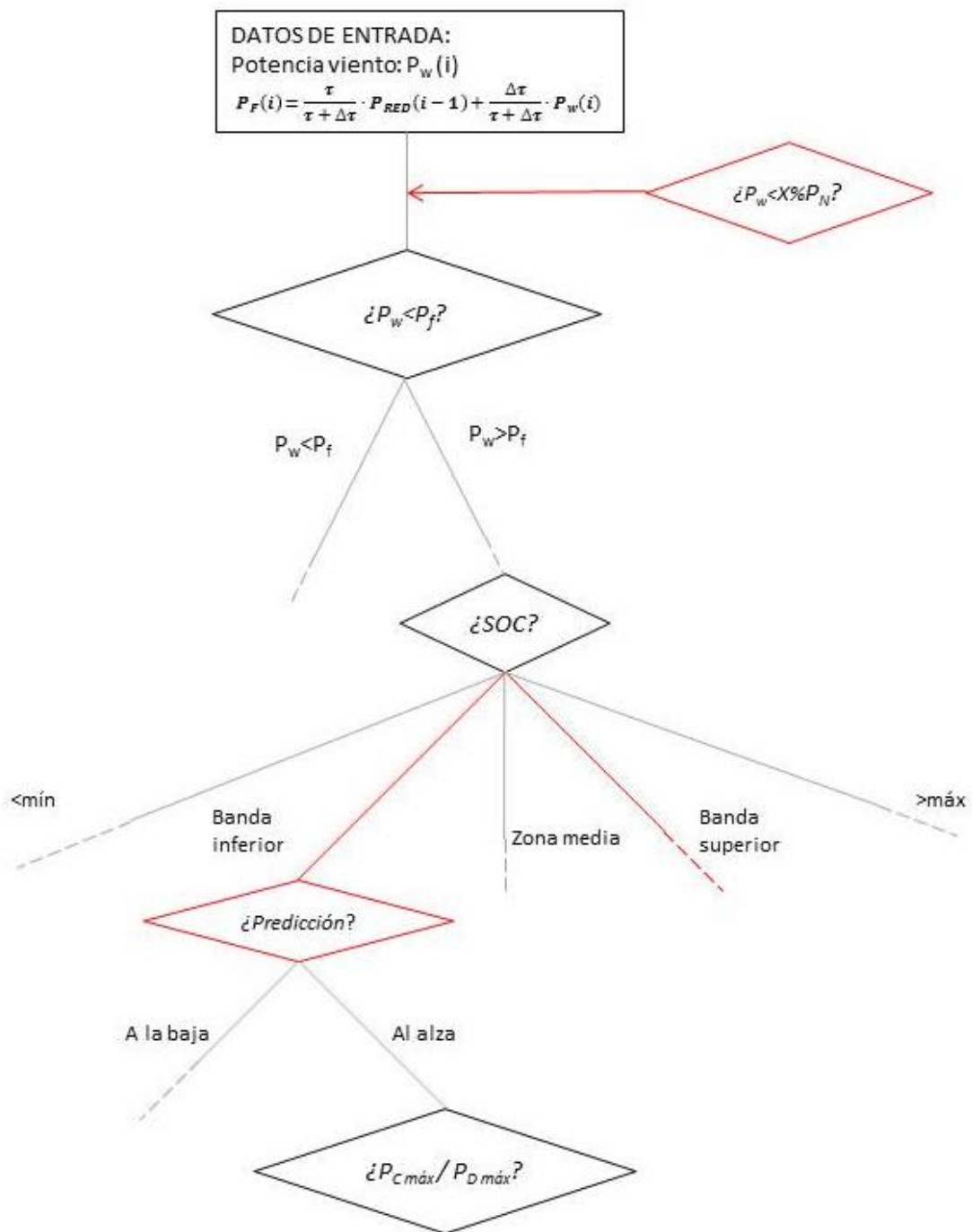


□ Conceptos novedosos

**Ilustración 8.3** Algoritmo simplificado suavizado de potencia sin limitación de potencia mínima.



## ALGORITMO SIMPLIFICADO FILTRAJE



■ Conceptos novedosos

**Ilustración 8.4** Algoritmo simplificado de suavizado de potencia con limitación de potencia mínima.

### *Firming*

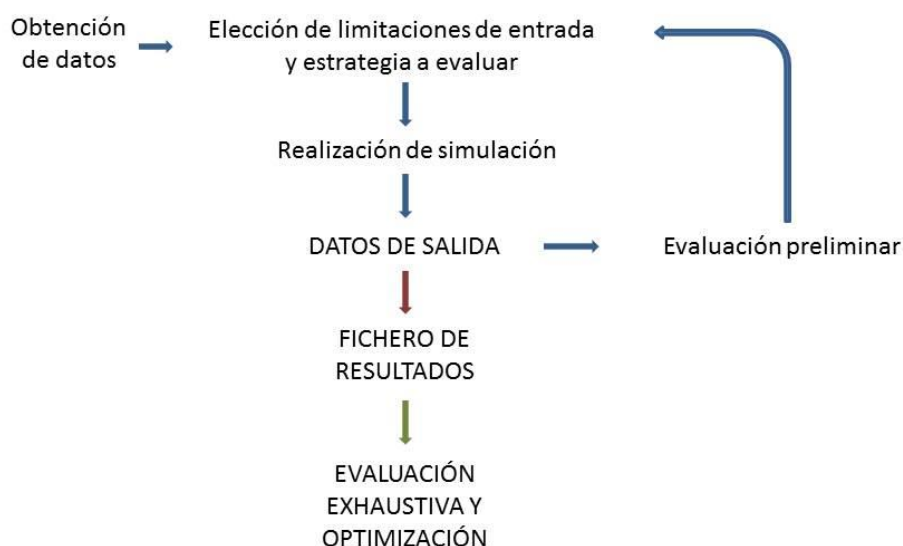
El caso de los algoritmos de firming es idéntico al de los de filtraje, a excepción de la fórmula de control utilizada, que es la expuesta en apartado 4.3. Por lo tanto, no se considera oportuno extenderse en la explicación del mismo.

## 9. SIMULACIONES

Para la ejecución de este Proyecto Fin de Carrera se han realizado más de 60 simulaciones anuales, lo que conlleva una cifra de más de 240 cuatrimestres simulados y posteriormente tratados. Con el ánimo de huir de análisis extra que pudieran resultar tediosos e infructuosos, aquí solo se describen aquellas simulaciones que arrojen las conclusiones más significativas. Sin embargo, se emplaza a quien pudiera mostrar interés a consultar mayor información. Además, muchas de estas simulaciones se encuentran en detalle en el apartado de anexos.

Todas las simulaciones se han ido diseñando según una estrategia por la que se lleva a cabo el análisis de los resultados obtenidos en la ejecución anterior antes de comenzar la siguiente. Este proceso iterativo se plantea esquematizado en la Ilustración 9.1.

### PROCESO DE SIMULACIÓN



**Ilustración 9.1** Proceso iterativo de diseño de simulaciones.

El procedimiento seguido para la ejecución de cada una de estas simulaciones es el descrito en el capítulo 6, en los apartados 6.1 y 6.3. La estrategia de las simulaciones que se muestran en esta memoria consiste en evaluar unos parámetros de potencia y capacidad sobredimensionados para, de ese modo, poder acotar los requerimientos mediante el estudio de los resultados proyectados por la simulación.

### 9.1 Una máquina

#### 9.1.1 Estudio preliminar del control de rampas

En este primer estudio se pretende una aproximación preliminar al control de rampas en la potencia suministrada por una máquina aislada. Se considera este escenario por tratarse, como se ha citado en el apartado 1.1, del más representativo en la vigilancia de las fluctuaciones y, al mismo tiempo, el más exigente. El objetivo consiste en

analizar cómo afectan al comportamiento del sistema de almacenamiento y a la evolución de la potencia inyectada a la red diferentes configuraciones o situaciones.

Los parámetros que se modifican a lo largo de este examen son:

- Capacidad nominal de almacenamiento.
- Potencia nominal de carga y descarga (se considerará siempre en este Proyecto Fin de Carrera una distribución de carga/descarga simétrica; es decir, la potencia máxima de carga y de descarga será la misma).
- La inclusión o no de bandas para el control del SOC
- El porcentaje de *ramp rate* restringido.
- Las eficiencias de cargas y descarga,  $\eta_c$  y  $\eta_d$ .

Los valores de capacidad de almacenamiento y potencia de carga y descarga ( $P_{Storage}$ ) se toman atendiendo a unos valores ya estudiados y publicados en diversa literatura, que se presentan como los más apropiados para el control de las rampas de potencia.

La introducción o no de bandas dentro del estado de carga del sistema de almacenamiento implica que cuando este se encuentre en dichos valores se modulará la potencia de carga y descarga con el fin de dar un mejor uso al sistema y alargar su vida útil, tal como se ha mencionado en el apartado 1.1. La pendiente de rampa admisible se mide como porcentaje de la potencia nominal de la máquina y en este estudio oscila entre el 5% y el 10%.

En definitiva, las simulaciones realizadas en este estudio preliminar son las que se muestran en la tabla siguiente:

	SIM 3	SIM 4	SIM 5	SIM 6	SIM 7	SIM 8	SIM 9	SIM 10	SIM 11	SIM 12
Capacidad (MWh)	0,5	0,25	0,25	0,5	0,5	1	0,5	0,25	0,25	0,25
$P_{Storage}$ (MW)	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,55
Bandas (SÍ/NO)	NO	NO	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
% rampas	5%	5%	5%	5%	5%	5%	10%	5%	5%	5%
$\eta_c, \eta_d$	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	95%	85%	90%

**Tabla 9.1** Resumen de las simulaciones realizadas en el estudio 1, control de ramp rate en una máquina aislada.

## Análisis de resultados generales

En primer lugar se estudian los resultados más generales tras el transcurso de un año completo. Se muestran en la siguiente tabla las capacidades utilizadas de almacenamiento, la energía de carga y descarga que ha fluido a través de la batería y el tiempo total en el que se ha incumplido el requerimiento impuesto.

$$\text{Capacidad Requerida Storage} = (SOC_{\text{máx}} - SOC_{\text{mín}}) / SNC_{\text{nominal}} \quad (9.1)$$

$$\text{Energía de carga o descarga} = \sum P_{s,i} \cdot t_i \quad (9.2)$$

$$\text{Tiempo total de incumplimiento} = \sum t_{\text{incumplimiento},i} \quad (9.3)$$

	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Capacidad requerida (MWh)	0,37	0,19	0,19	0,35	0,36	0,64	0,33	0,19	0,19	0,19
Energía de Carga (MWh)	199	197	195	197	237	198	100	184	205	195
Energía de descarga (MWh)	161	160	158	159	192	160	81	166	148	168
Minutos de incumplimiento	25.092	25.574	28.961	27.620	19.125	26.813	11.553	29.734	29.445	27.543
Número de ciclos carga/descarga	25.287	25.285	24.990	25.041	24.578	25.064	17.100	25.622	24.303	25.222

**Tabla 9.2** Principales resultados obtenidos en el estudio de control de rampas preliminar.

Ya en estos primeros resultados de carácter más general se pueden observar ciertos comportamientos del sistema. En primer lugar, a igualdad de restricciones, aquellos sistemas en los que se introducen bandas de control del estado de carga presentan más casos de incumplimiento de las condiciones, pero el uso que se hace de la batería es menos agresivo, prolongándose ligeramente su vida útil. También se aprecia, estudiando las simulaciones 7 y 8 en comparación con sus hermanas, que la capacidad del sistema para cumplir las limitaciones de rampa responderá más a una cuestión de potencia de carga y descarga que de volumen energético de almacenamiento.

De la simulación 9 podemos concluir que la limitación de *ramp rate* impuesta no afecta de manera evidente al rango de estado de carga a emplear (Capacidad Requerida Storage), pero sí al flujo energético que atraviesa el sistema de almacenamiento. Además, de la simulación 7, vemos que una mayor potencia en el sistema incurre en un incremento de la energía que fluye a través de la batería.

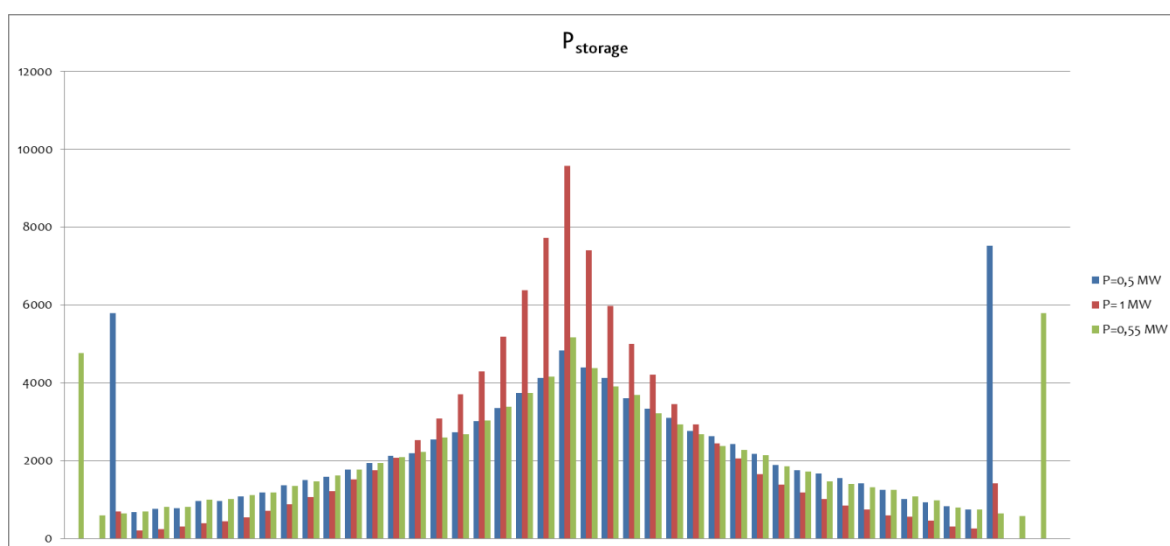
En la simulación 10 se da una situación bastante particular. A pesar de tener una mayor eficiencia se dan más casos de incumplimiento. Esto puede deberse a que al tener una muy buena eficiencia se acentúa más el problema de las diferentes dinámicas de subida y bajada que se producen en las turbinas, por lo que el sistema tiende a cargarse más claramente. Este efecto no puede expresarse con rotundidad con una muestra tan limitada, por lo que se plantea como línea a desarrollar. Por su parte, la simulación 11, donde se ha supuesto un menor rendimiento del sistema, sí que absorbe peor las fluctuaciones que en lo observado en la simulación 5.

## Potencia del almacenamiento

Se estudia el uso que se hace de la potencia del almacenamiento para los ciclos de carga y descarga. Para ello se realizan histogramas (véase el anexo) con el fin de observar cuáles son la profundidad de los ciclos que más se repiten. Si existe acumulación de eventos en los extremos será síntoma de que la potencia es insuficiente.

Para el estudio de los histogramas de la potencia de almacenamiento debe tenerse en cuenta que la cuantía en que sobresalgan los extremos – de valor fijo – dependerá del intervalo de estudio que se seleccione. Además será interesante establecer qué diferencia entre los valores extremos y los adyacentes es susceptible de considerarse importante para plantear el aumento de la potencia del almacenamiento.

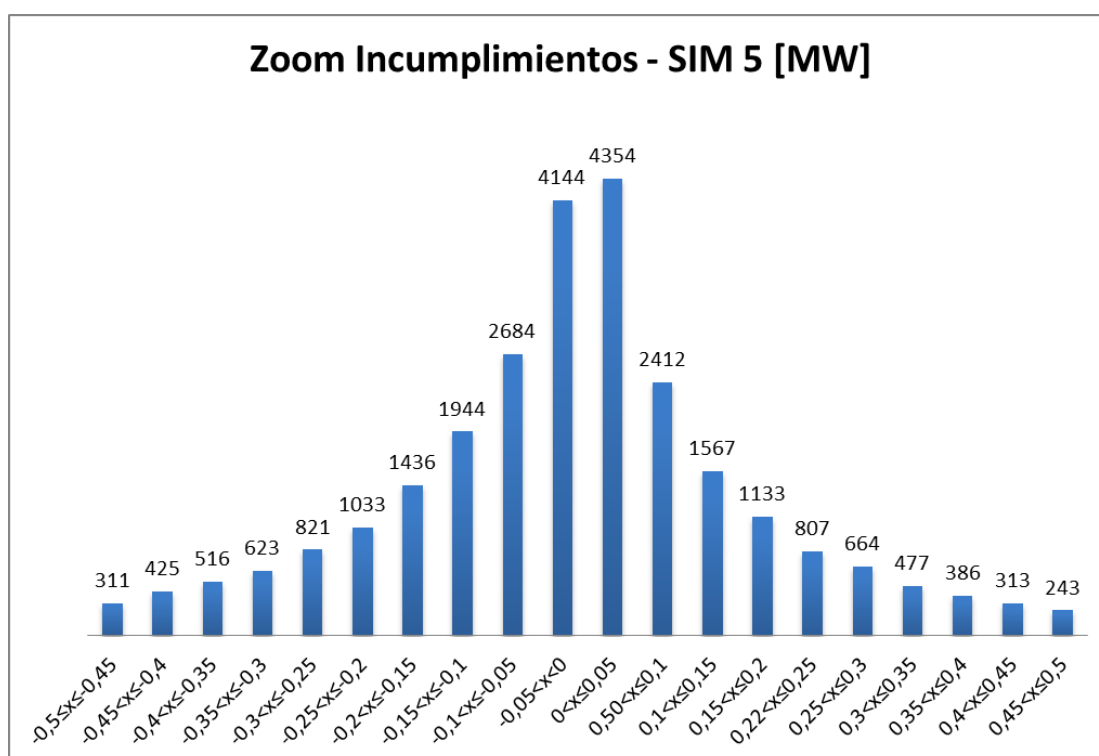
El análisis de los casos más representativos ( $P_{storage} = 1 \text{ MW}$ ,  $0,5 \text{ MW}$  y  $0,55 \text{ MW}$ ) se puede apreciar en la Ilustración 9.2. Resulta evidente que la potencia seleccionada en este estudio preliminar se antoja escasa para la absorción de las variaciones de potencia en la generación.



**Ilustración 9.2** Representación de histogramas más representativos de  $P_{storage}$  para  $P=0,5 \text{ MW}$ ,  $0,55 \text{ MW}$  y  $1 \text{ MW}$ .

## Incumplimientos

A pesar de que, evidentemente, el número de incumplimientos que se dan en este estudio es ciertamente elevado, no son en su mayoría de una gran profundidad. Es decir, la mayoría de sobrepasamientos son por escasos kilovatios de potencia. Si se realiza un histograma de dichos eventos, e incluso ampliándolo a modo de zoom en su parte central como en la Ilustración 9.3, se observa que un alto porcentaje de estos eventos se concentra en la zona media.



**Ilustración 9.3** Histograma de incumplimientos dentro de un umbral de desviación de  $\pm 500$  kW en la simulación 5 del Estudio 1.

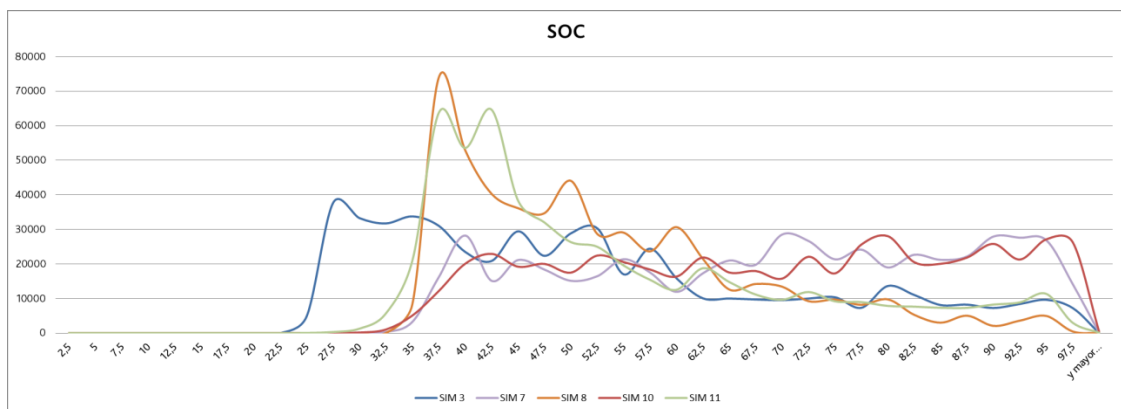
Debido a la alta acumulación de eventos en torno a la media de la muestra, parece comprensible pensar que ampliando la potencia de la batería solamente en 50 kW ( $P_c=0,55$  MW) reduciríamos los incumplimientos en aproximadamente 9000 minutos. Sin embargo, la simulación 12 arroja un resultado lejano a esa cifra: se consigue reducir el tiempo de incumplimiento en algo más de 2000 minutos.

En este punto, debe tenerse en cuenta que existe una cantidad considerable de datos falsos en la muestra, debido a circunstancias de desconexión o de mala transmisión de las mediciones. Estas situaciones solo se absorberían en caso de colocar un sistema de almacenamiento cuya potencia fuera igual a la potencia nominal de la máquina, algo que no es ni viable ni lógico.

## SOC

Para el caso del SOC se repite el mismo procedimiento que para la potencia. Se estudia, por medio de histogramas, si el dimensionamiento de la capacidad es adecuado o no, obteniéndose los análisis que siguen.

- En las primeras cuatro simulaciones se puede apreciar cómo, cuando la capacidad nominal de la batería es mayor, el uso de la misma se concentra en valores menos extremos.
- En la simulación 7 parece que la relación potencia-capacidad del almacenamiento es muy exigente, mientras que en la 8 se da el caso completamente opuesto.
- En los casos 10 y 11 se observa una influencia muy alta del rendimiento en el estado de carga de la batería. En este caso, para rendimientos menores el histograma queda mucho más centrado que para rendimientos mayores, donde vuelve a apreciarse de manera contundente la tendencia que el conjunto del sistema tiene de por sí a cargarse constantemente.



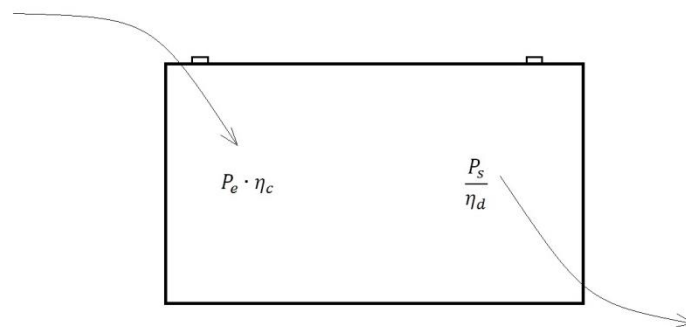
**Ilustración 9.4** Representación de histogramas de SOC más representativos del estudio preliminar de rampas.

## Conclusiones

- ✓ El uso de bandas de control del SOC implica mayor tiempo de incumplimiento de los requerimientos, pero se prolonga la vida útil del sistema.
- ✓ La limitación de rampas impuesta no afecta a la capacidad necesaria del sistema, pero sí al flujo energético que atraviesa la batería.
- ✓ La respuesta ante rampas depende más de la potencia del almacenamiento que de la capacidad energética de éste.
- ✓ Sin embargo, el aumento de la potencia de carga/descarga no garantiza la absorción de las fluctuaciones de manera proporcional o lineal y lo hace en ratios menores a los esperados. Este punto podría confirmarse con la curva propuesta en el punto 2 de la sección “Líneas a desarrollar”).



- ✓ Evidentemente, con requerimientos de control de rampa menos exigente disminuye el tiempo de incumplimientos y el envejecimiento por uso de la batería.
- ✓ Para el control del *ramp rate* al 5% de la potencia nominal de la máquina AW-3000 en Barásoain, una potencia de carga y descarga de 500 kW se antoja un poco corta, mientras que una de 1 MW tal vez sea demasiado generosa.
- ✓ El hecho de que el trasiego de energía de carga sea mayor que el de descarga indica que, en el caso eólico, el sistema tiende un poco hacia la carga. Esto puede deberse al propio control de la máquina, que está diseñada para que el aprovechamiento del viento sea el mayor posible (y por tanto la generación de energía eléctrica también sea la máxima). Esto provoca que las fluctuaciones positivas sean mayores que las negativas. Además, el movimiento de las palas también porta una inercia que hace que ante la falta de viento se frenen de manera más lenta, colaborando con este efecto.
- ✓ En cuanto al uso o aprovechamiento del estado de carga de la batería (SOC) se observa una elevada influencia del  $\eta_c$  y  $\eta_d$ . La potencia dentro de la batería es  $P_e \cdot \eta_c$  en el caso de la carga del sistema, y  $P_s / \eta_d$ , en el de descarga. En este PFC se supone un sistema simétrico. Por tanto, teniendo en cuenta la tendencia del sistema a cargarse ligeramente comentada en el punto anterior, la relación entre la potencia que entra al sistema y la que sale es la que se muestra en la ecuación (9.4).



**Ilustración 9.5** Flujo de potencias, con sus rendimientos, en la batería.

$$P_e = \frac{P_s}{\eta_c \cdot \eta_d} \quad (9.4)$$

A menores rendimientos, el sistema tenderá a descargarse por efecto del doble rendimiento. En un caso ideal, cuando los rendimientos fueran la unidad, el sistema tendería a la horizontalidad, pero como hemos visto en el caso de la energía eólica esto supondrá una ligera predisposición hacia la carga.

## Líneas a desarrollar

1. Pudiera resultar interesante estudiar el ratio (mejora de la vida útil – incumplimientos), para ver hasta qué punto conviene centrarse en la absorción de todas las fluctuaciones posibles en detrimento de prolongar el tiempo que la batería pueda funcionar a pleno rendimiento.
2. Otro punto a desarrollar puede ser la realización de curvas de la evolución del tiempo de incumplimiento en función del aumento de  $P_{Storage}$  para diferentes requerimientos de rampas. Es evidente que a mayor potencia de almacenamiento mayor será la capacidad del sistema de absorber las fluctuaciones de potencia. Sin embargo, se observa que esta no se trata de una relación proporcional, ni tan siquiera lineal. Realizar esta curva para diferentes requerimientos de porcentaje de rampas podría constituir una herramienta válida para determinar, de manera visual, el sistema de almacenamiento más eficiente y eficaz.
3. Se propone también un estudio del influjo de la eficiencia en la absorción de incumplimientos, teniendo en cuenta el impacto de las distintas dinámicas de subida y bajada en la potencia del aerogenerador.

### 9.1.2 Estudio 2: Sistema de almacenamiento *a priori* sobredimensionado

La idea de este estudio radica en evaluar el comportamiento de un sistema de almacenamiento sobredimensionado para poder acotar después qué características de batería serían razonables y si puede considerarse cierto lo expuesto hasta ahora en la literatura. Se analiza minuto a minuto todos los escenarios planteados en el PFC – control de rampas, filtraje y *firmiting* de potencia – con el mismo almacenamiento conectado en paralelo a la misma máquina – la turbina A101, de 3 MW de potencia nominal, del parque de Barásoain – entre mayo de 2013 y mayo de 2014. El sistema de almacenamiento que se configura es una batería de 2 MW de potencia y una hora de capacidad.

Se pretende a su vez estudiar el influjo de otros dos parámetros: una limitación de potencia eólica del 20% de la potencia nominal necesaria para la activación de la batería y la introducción o no de bandas de control del SOC.

Por tanto, los escenarios analizados son:

1. Control de rampas del 5% con respecto a la potencia nominal
2. Filtrado de la potencia inyectada a la red con una constante de tiempo  $\tau=10$  minutos.
3. *Firmiting* de potencia con un 5% de la potencia nominal de desviación máxima.

Y para cada uno de los escenarios se implementan las siguientes estrategias:

- Con restricción del 20% de la potencia nominal de la máquina para el arranque de la batería y con bandas de modulación del SOC.
- Sin restricción del 20% de la potencia nominal de la máquina para el arranque de la batería y con bandas de modulación del SOC.
- Sin restricción del 20% de la potencia nominal de la máquina para el arranque de la batería y sin bandas de modulación del SOC.

NOTA: La cuarta combinación (con restricción del 20% para la entrada en funcionamiento de la batería, sin presencia de bandas de control del SOC) no se realiza, debido a que tras los resultados obtenidos se observa que carece de sentido.

### Control de rampas al 5% de la potencia nominal de la máquina

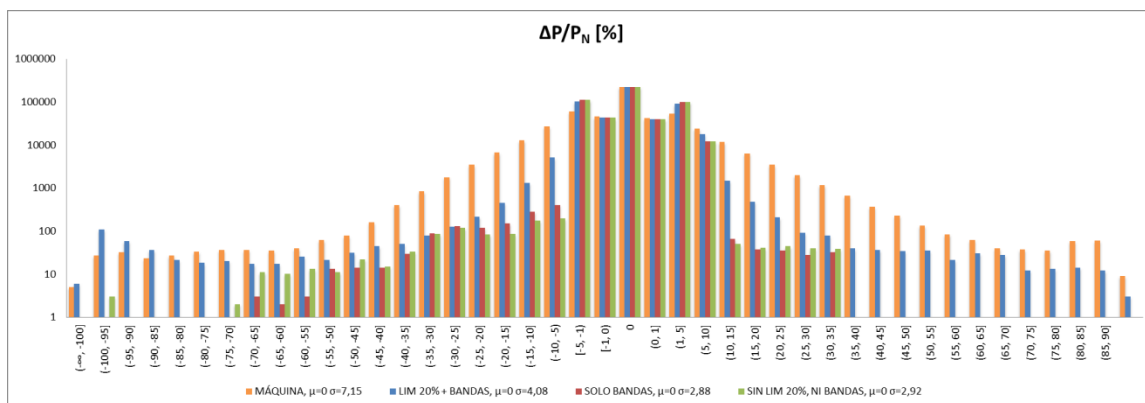
Realizadas las simulaciones de control de rampas al 5% de la potencia nominal de la máquina, con las tres estrategias posibles, se observan los siguientes resultados en cuanto al uso de la batería.

	LIM 20% + BANDAS	SOLO BANDAS	SIN LIM 20%, NI BANDAS
CAPACIDAD REQUERIDA STORAGE	1,25 MWh	1,43 MWh	1,45 MWh
ENERGÍA TRASEGADA CARGA	250,61 MWh	313,49 MWh	312,66 MWh
ENERGÍA TRASEGADA DESCARGA	202,42 MWh	253,72 MWh	253,04 MWh
TIEMPO DE INCUMPLIMIENTO	20.355 min.	1.934 min.	558 min.

**Tabla 9.3** Resultados uso de batería en estrategia control de rampas, estudio 2.

Probablemente, la conclusión más evidente que puede extraerse de este análisis se centra en el impacto de beneficiarse de aquellos códigos de red en los que no se exige el cumplimiento de los requerimientos cuando la potencia generada está por debajo del 20% de la potencia nominal. Acogerse a esta situación supone un descenso del 14% en la capacidad de almacenamiento utilizada y del 25% de energía total fluyente a través de la batería.

Por otro lado, la evolución del tiempo de incumplimiento en función de la estrategia empleada es otro aspecto a destacar importante. Se observa que cuantas más limitaciones se introducen en la batería, es decir, cuanto más se modula su funcionamiento, menor es la capacidad de la misma para absorber estas fluctuaciones. Sobresale especialmente el caso de la limitación del 20%, si bien esto es lógico ya que gran cantidad de las fluctuaciones se producen cuando la potencia está en niveles bajos y ahí, debido a la curva de potencia eólica de un aerogenerador que se ha expuesto en la Ilustración 1.2, la magnitud de las mismas se multiplica.



**Ilustración 9.6** Histograma de fluctuaciones en la potencia inyectada en red para todas las estrategias implementadas en el escenario de control de rampas del estudio 2.

Fecha	tiempo	P.Eólica (W)	P.Red (MW)	P.Storage	SOC Stora	Pmis	Plos
25/10/2013 11:39	7385940	14,9813401	14,9813401	0	64,4688492	0	0
25/10/2013 11:40	7386000	15,0599719	15,0599719	0	64,4688492	0	0
25/10/2013 11:41	7386060	14,9698582	14,9698582	0	64,4688492	0	0
25/10/2013 11:42	7386120	15,0369152	15,0369152	0	64,4688492	0	0
25/10/2013 11:43	7386180	15,0999878	15,0999878	0	64,4688492	0	0
25/10/2013 11:44	7386240	14,947941	14,947941	0	64,4688492	0	0
25/10/2013 11:45	7386300	13,3863868	14,2782814	-0,89189451	64,3036836	0	0
25/10/2013 11:46	7386360	7,27363933	14,0254034	-6,75176407	63,0533569	0	0
25/10/2013 11:47	7386420	1,62100319	1,62100319	0	63,0533569	12,0462054	0
25/10/2013 11:48	7386480	4,4820526	9,22489598	-4,74284338	62,1750526	0	0
25/10/2013 11:49	7386540	9,59631375	9,04043419	0,55587956	62,2584345	0	0
25/10/2013 11:50	7386600	14,1644964	7,37877778	6,78571858	63,2762923	0	0
25/10/2013 11:51	7386660	15,0060373	9,29803598	5,70800132	64,1324925	0	0

**Ilustración 9.7** Muestra de la problemática derivada de la limitación de entrada en funcionamiento de la batería en caso de desconexiones o fluctuaciones negativas bruscas.

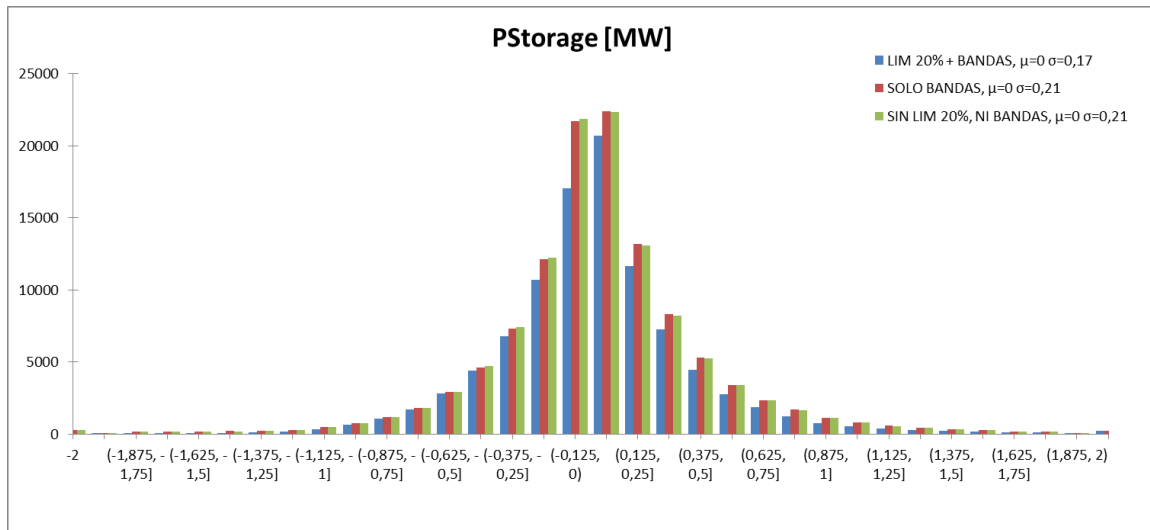
Como se observa en la Ilustración 9.7 existe una problemática en torno a la limitación de la entrada en funcionamiento de la batería. Cuando se produce una desconexión de la máquina o de la lectura de los datos, o simplemente existe una fluctuación negativa muy brusca, el algoritmo entra en zona de  $P_W < 0,2 * P_N$  por lo que la batería no se utiliza. Como justo antes se había corregido la rampa mediante la descarga de la batería, la rampa con batería es mucho mayor que sin ella.

Además, si se trata de una desconexión, la siguiente rampa máxima y mínima se calcula en base a la potencia inyectada en el punto anterior, por lo que, al volver a los parámetros de potencia eólica normales, se genera un incumplimiento por exceso después de haberse generado el propio por déficit.

Por consiguiente se plantea como solución desarrollar el control siguiendo una media móvil, de manera que se minimicen los errores derivados de una desconexión o de una perturbación de los datos.

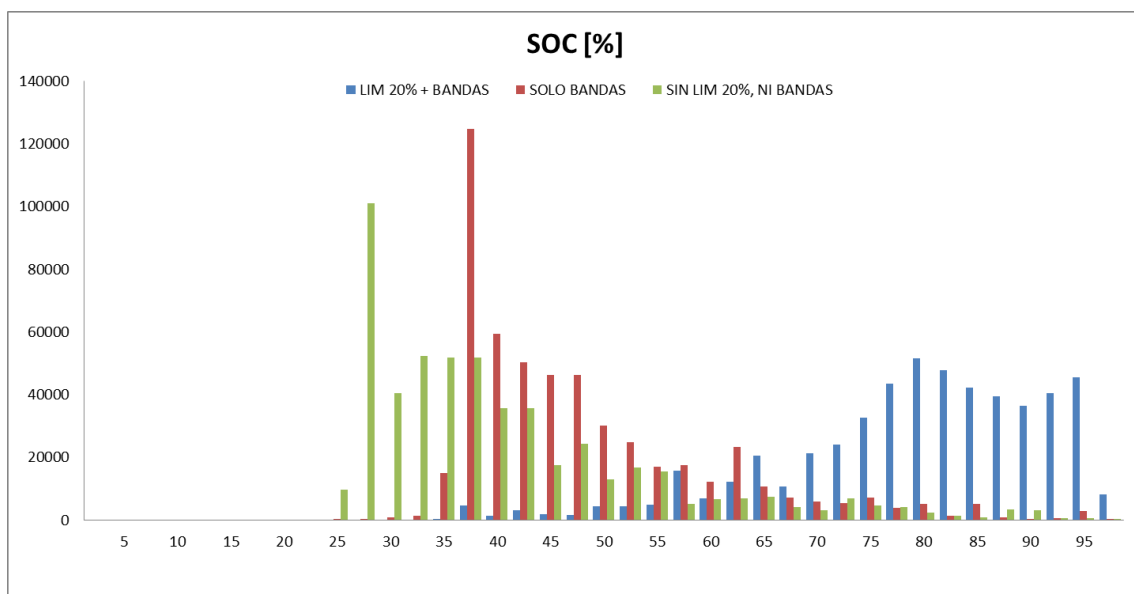
En cuanto a la potencia de la batería y el uso que se hace de ella a lo largo de un año entero de producción, los resultados concluyen que la limitación del 20% constituye un

ahorro en la utilización del sistema de almacenamiento de casi un 15%. En el caso con limitación los eventos en que la potencia no es nula son 99.000 frente a los aproximadamente 115.500 del caso sin limitación.



**Ilustración 9.8** Histograma de potencia de la batería para todas las estrategias implementadas en el escenario de control de rampas del estudio 2, excluidos los valores  $P_s=0$ .

En las publicaciones realizadas hasta la fecha en diferente bibliografía se hace referencia a que una batería con una potencia de aproximadamente el 15% de la potencia nominal de la máquina debiera ser suficiente para absorber la mayor parte de las fluctuaciones. En este caso, observando el histograma de la Ilustración 9.8 y las escasas desviaciones típicas del mismo, se aprecia que esta afirmación es cierta. De hecho, en todos los casos, un rápido cálculo con los datos desgranados del histograma indica que más del 96% de los eventos de potencia utilizada se encuentran dentro de dicho intervalo.



**Ilustración 9.9** Histogramas del estado de carga SOC para el caso de control de rampas del estudio 2.

En el caso del estado de carga, SOC, se comprueba que la limitación del 20% de nuevo marca una diferencia significativa en el comportamiento del sistema, caso en el que tiende a cargarse ligeramente. La explicación a esto radica en que, generalmente, las fluctuaciones que tienen lugar en este umbral son fluctuaciones negativas (desconexiones, caídas bruscas de la velocidad del viento, etc.) que requieren de procesos de descarga por parte del sistema de almacenamiento. Si se limita la capacidad del sistema de actuar, el sistema ejecutará proceso de carga mucho más a menudo que el caso contrario.

En cuanto a la inclusión de bandas, se observa que el comportamiento del SOC es muy parecido, apreciándose únicamente un estrechamiento del histograma en el caso de existir bandas moduladoras debido a que el límite de modulación se establece en porcentajes del SOC algo mayores, en torno al 35% frente al 25% inicial.

Se percibe también que, como era de esperar, los desplazamientos del SOC son relativamente pequeños como consecuencia de que la capacidad del sistema está sobredimensionada.

#### Suavizado de potencia con un estadismo $\tau=10$ minutos

El caso del filtraje es, en esencia similar al del control de rampas, como se ha explicado en el apartado 4.2. Además la constante de tiempo elegida, diez minutos, supondría una aproximación a un control de rampas del 6%, muy similar al 5% estudiado en el caso anterior.

Sin embargo, cabe esperar que el escenario de suavizado de potencia sea, a diferencia del de control de rampas, más exigente para la batería en términos de energía que de potencia.

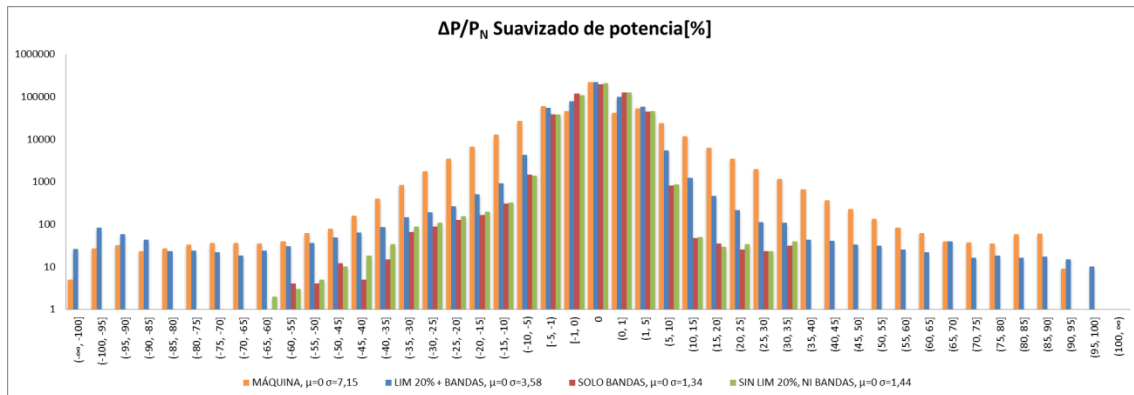
	LIM 20% + BANDAS	SOLO BANDAS	SIN LIM 20%, NI BANDAS
CAPACIDAD REQUERIDA STORAGE	1,99	1,60	1,60
ENERGÍA TRASEGADA CARGA	492,82 MWh	656,54 MWh	667,60 MWh
ENERGÍA TRASEGADA DESCARGA	398,73 MWh	531,85 MWh	540,92 MWh

**Tabla 9.4** Uso de batería en el escenario de suavizado de potencia del estudio 2.

Los resultados obtenidos confirman esta presuposición y se comprueba que, en términos de energía, el uso de la batería es aproximadamente el doble que en el caso de las rampas.

En el análisis de las fluctuaciones en la potencia inyectada en la red son dos las conclusiones. Por un lado, en comparación con el control de rampas la absorción de estas variaciones es mayor y el histograma tiende a estrecharse más y por ello se ha incluido en el mismo el estudio del intervalo  $[-1, 1]$ . Por el otro, se observa también

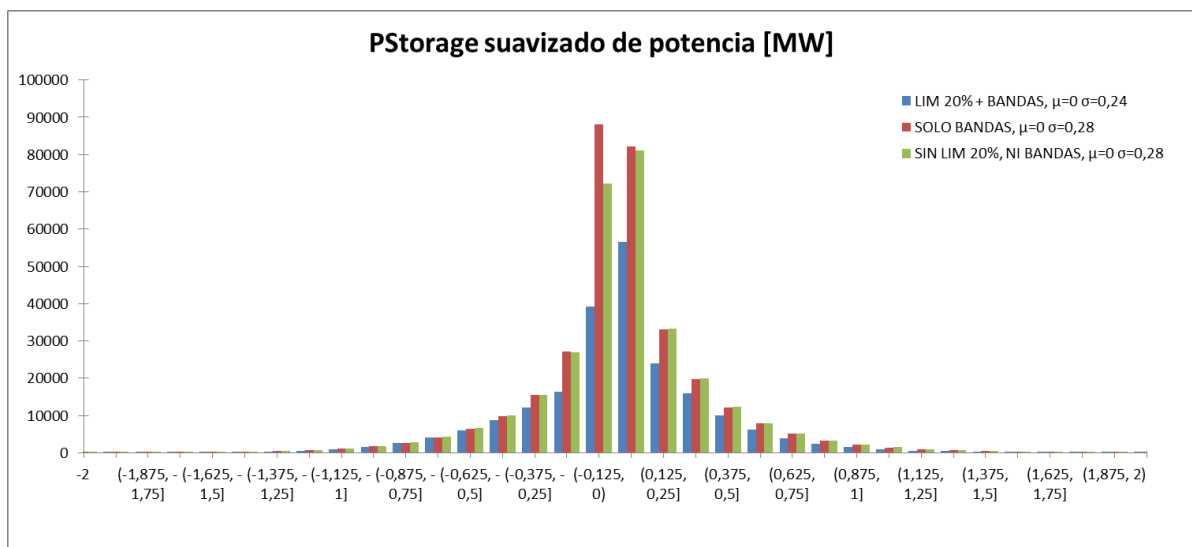
que en el caso de no introducirse bandas de modulación la desviación estándar aumenta, es decir, se absorben peor las oscilaciones en la potencia.



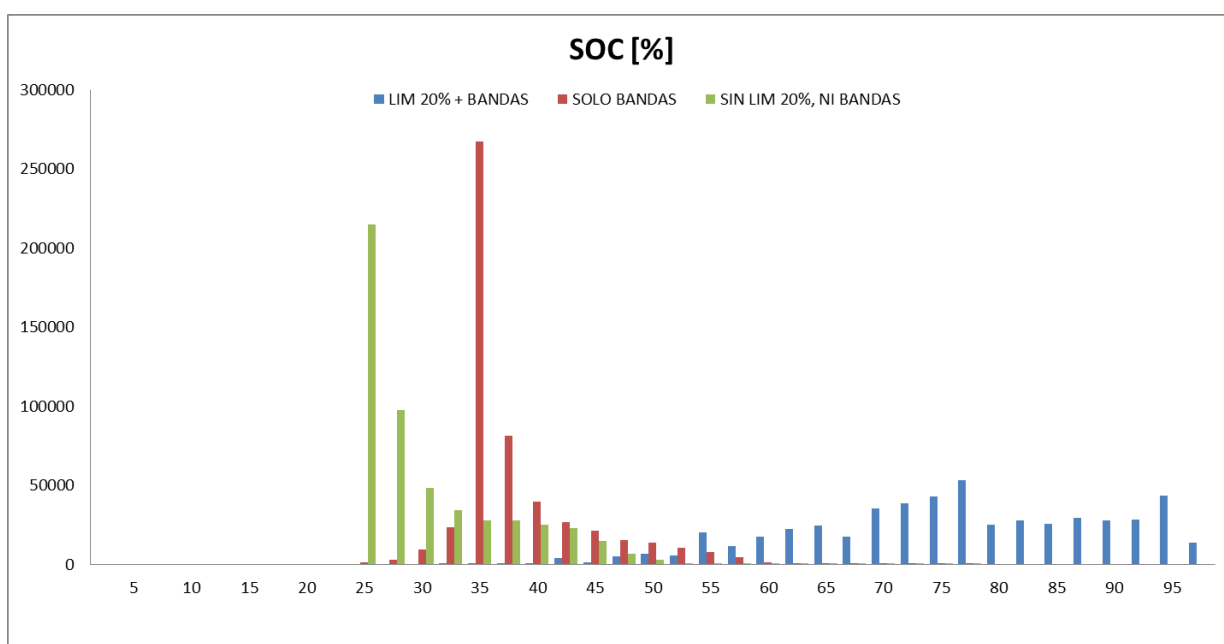
**Ilustración 9.10** Histograma de fluctuaciones en la potencia inyectada en red para todas las estrategias implementadas en el escenario de suavizado de potencia del estudio 2.

El ahorro derivado de la inclusión de la limitación del 20%, tanto en términos de potencia como de energía, es muy inferior que en el control de rampas. Añadiendo a esto el análisis de la absorción de las variaciones de la potencia puede concluirse que en el caso del suavizado de potencia la inclusión de esta limitación prácticamente carece de sentido.

También se desprende de este estudio que la batería sufre en el caso del filtraje un número de procesos de carga y descarga mucho mayor, pero en profundidades mucho menores, aunque el cómputo global de todas ellas constituye un flujo de energía a través de la misma más elevado.



**Ilustración 9.11** Histograma de potencia de la batería en el escenario de suavizado de potencia del estudio 2, excluidos los valores  $P_s=0$ .



**Ilustración 9.12** Histograma de SOC de la batería para las tres estrategias en el escenario de suavizado de potencia del estudio 2.

En términos de estado de carga el caso del filtraje es idéntico al de rampas: similitud en los casos sin limitación del 20%, que están sobredimensionados, y tendencia a cargarse del caso con limitación.

### *Firming de potencia con una desviación máxima del 5%*

Para la estrategia de *firming* no existe un criterio de bondad del tipo variaciones de potencia como en los casos de control de rampas y suavizado de potencia, ya que se trata de una estrategia algo diferente. Por consiguiente, el estudio se centra en este caso en el uso de la batería en términos de potencia y de energía.

	LIM 20% + BANDAS	SOLO BANDAS	SIN LIM 20%, NI BANDAS
CAPACIDAD REQUERIDA STORAGE	1,44	1,46	1,46
ENERGÍA TRASEGADA CARGA	517,98 MWh	565,09 MWh	561,77 MWh
ENERGÍA TRASEGADA DESCARGA	419,84 MWh	457,99 MWh	455,37 MWh

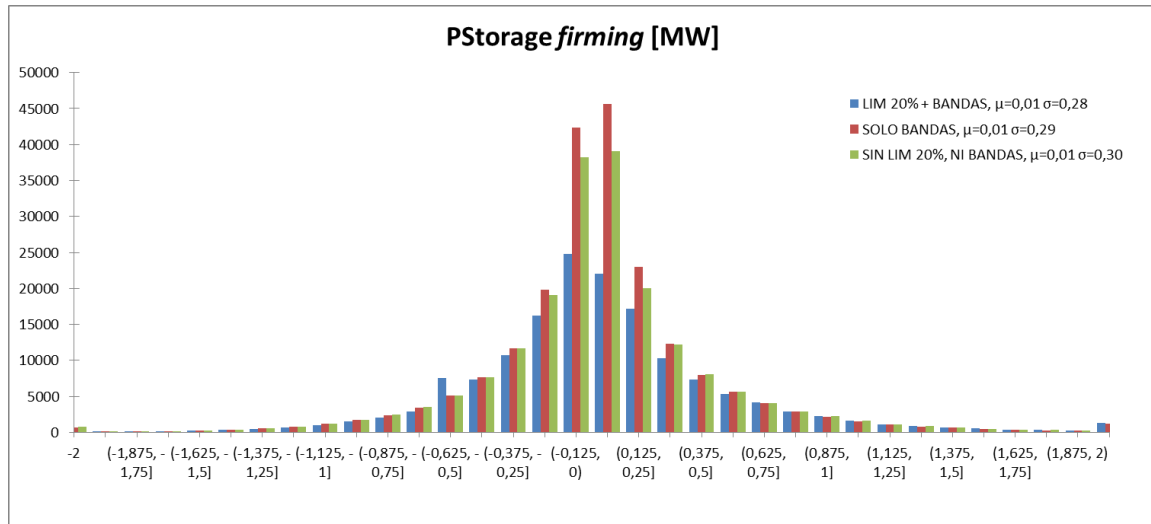
**Tabla 9.5** Uso de batería en el escenario de *firming* de potencia del estudio 2.

Como se desprende de la Tabla 9.5, el hecho de incluir la limitación del 20% no constituye un ahorro significativo de energía. Tampoco es excesivo el ahorro en términos de potencia, por lo que puede afirmarse que en el caso del aseguramiento de

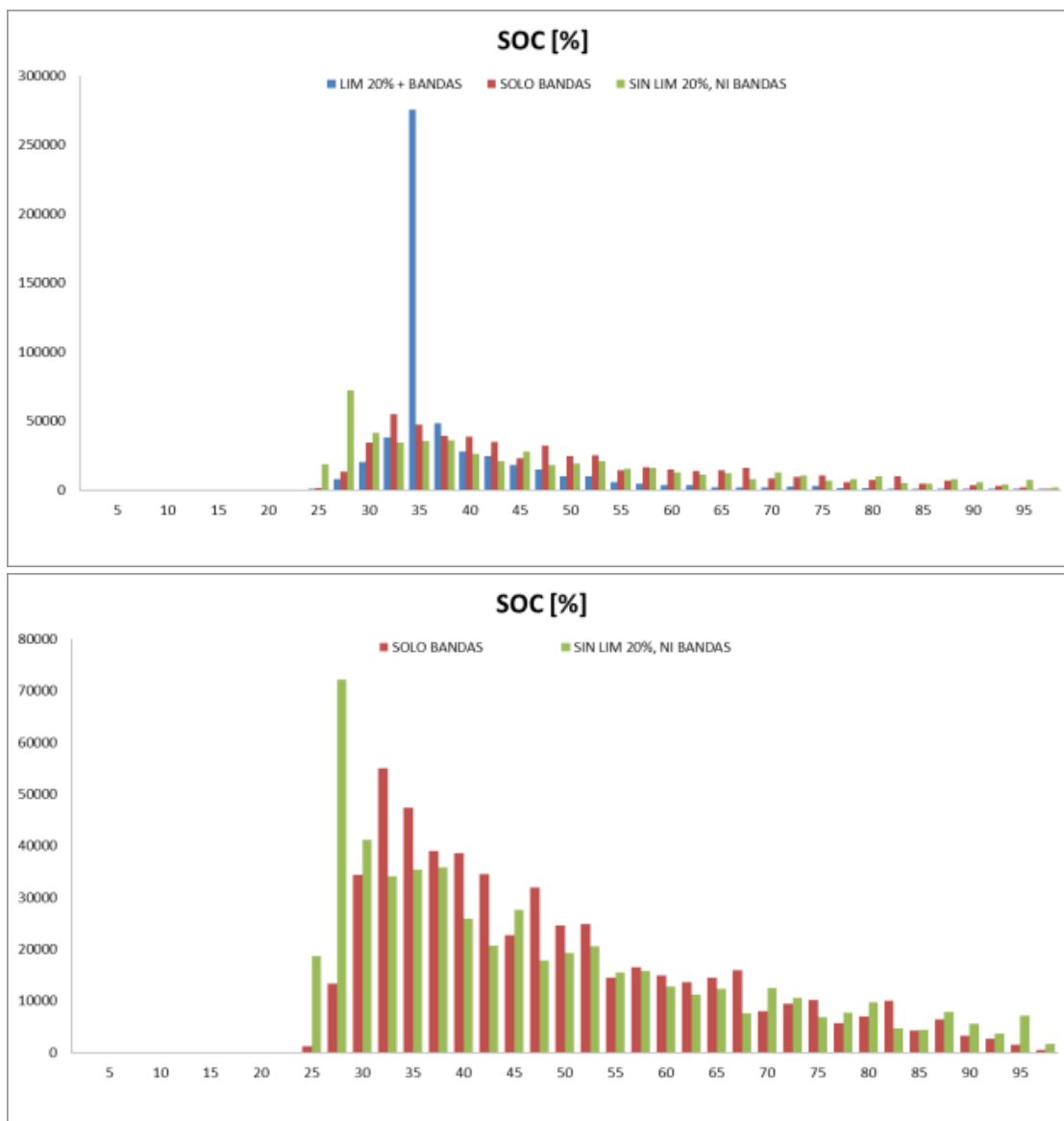


potencia la limitación del 20% también en este caso puede resultar irrelevante o incluso desaconsejado.

El comportamiento en términos de potencia puede considerarse muy similar al caso del suavizado de potencia.



**Ilustración 9.13** Histograma de potencia de la batería en el escenario de *firming* de potencia del estudio 2, excluidos los valores  $P_s=0$ .



**Ilustración 9.14** SOC para las tres estrategias de firming de potencia del estudio 2 y excluyendo el caso de limitación del 20%.

La Ilustración 9.14 muestra cómo en el escenario de firming el SOC se encuentra muy sobredimensionado para el caso en que se incluye la limitación del 20%.

## Conclusiones

Por consiguiente, puede concluirse de este segundo estudio una serie de resultados que se resumen en los siguientes puntos:

- El ahorro en el uso de la batería en el caso de incluir una limitación del 20% de la potencia nominal en la turbina para que la batería funcione es, como resulta evidente, importante y lo será mayor cuanto mayor sea este umbral. Sin embargo, debe estudiarse la conveniencia de implantarse esta estrategia, especialmente en los casos de suavizado de potencia y de *firming*.

- En el caso del suavizado y de *firmit* de potencia la inclusión de una limitación para utilizar la batería únicamente cuando la potencia generada por la máquina esté por encima del 20% de la potencia nominal, carece prácticamente de sentido.
- En cuanto a la inclusión de bandas, se observa que el comportamiento del SOC es muy parecido
- Se establece como línea de mejora futura el desarrollar el control siguiendo una media móvil, de manera que se minimicen los errores derivados de posibles desconexiones o perturbaciones de los datos.

## 9.2 Parque completo

Para este tercer estudio se sigue un procedimiento idéntico al caso anterior, con el fin de comparar posteriormente ambos resultados y establecer qué opción de almacenamiento – máquina a máquina o para el parque en su totalidad – es la óptima. Así pues, se analiza también minuto a minuto los tres escenarios planteados con una batería sobredimensionada – en este caso de 3 MW de potencia y una hora de almacenamiento – entre mayo de 2013 y mayo de 2014. .

Los escenarios analizados son también esta vez:

1. Control de rampas del 5% con respecto a la potencia nominal
2. Filtrado de la potencia inyectada a la red con una constante de tiempo  $\tau=10$  minutos.
3. *Firmit* de potencia con un 5% de la potencia nominal de desviación máxima.

Y para cada uno de los escenarios se implementan las siguientes estrategias:

- Con restricción del 20% de la potencia nominal de la máquina para el arranque de la batería y con bandas de modulación del SOC.
- Sin restricción del 20% de la potencia nominal de la máquina para el arranque de la batería y con bandas de modulación del SOC.
- Sin restricción del 20% de la potencia nominal de la máquina para el arranque de la batería y sin bandas de modulación del SOC.

NOTA: La cuarta combinación (con restricción y sin bandas) no se realiza, debido a que tras los resultados obtenidos se observa que carece de sentido.

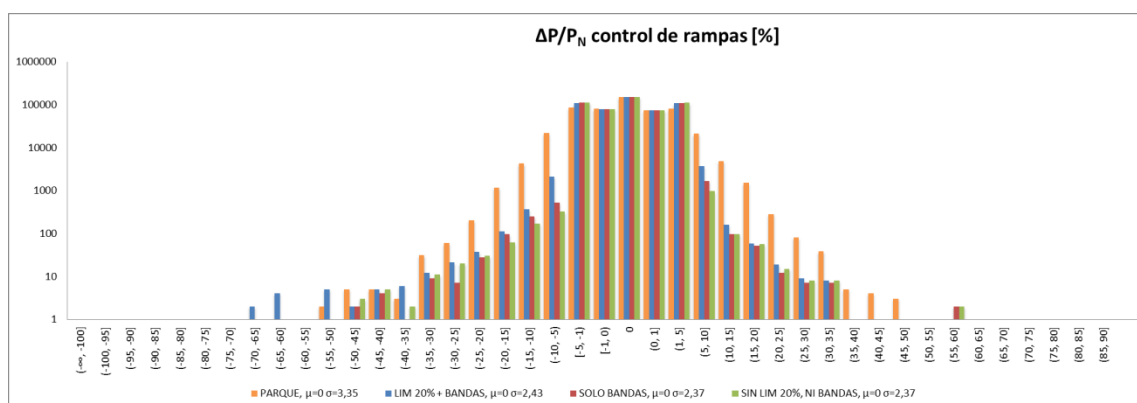
## Control de rampas al 5% de la potencia nominal de la máquina

Realizadas las simulaciones de control de rampas al 5% de la potencia nominal de la máquina, con las tres estrategias posibles, se observan los siguientes resultados.

	LIM 20% + BANDAS	SOLO BANDAS	SIN LIM 20%, NI BANDAS
NÚMERO DE CICLOS	17.848	19.240	19.392
% VIDA BATERÍA USADA	9,37 %	10,12%	10,19 %
ENERGÍA TRASEGADA CARGA	325,53 MWh	343,73 MWh	347,09 MWh
ENERGÍA TRASEGADA DESCARGA	263,24 MWh	278,45 MWh	281,35 MWh
TIEMPO DE INCUMPLIMIENTO	6102 min. (1,16%)	2086 min. (0%)	716 min. (0%)

**Tabla 9.6** Principales resultados simulación parque completo escenario control de rampa.

En el caso del parque completo, a causa del efecto de la agregación de máquinas, el histograma de las variaciones de potencia del que partimos es más estrecho que cuando se analiza una máquina aislada. Esto ya nos hace indicar que, a priori, los requerimientos de potencia y energía de la batería serán menores en comparación que en el estudio 2. Es objeto de este estudio corroborar esta presunción.



**Ilustración 9.15** Histograma de fluctuaciones en la potencia inyectada en red para todas las estrategias implementadas en el escenario de control de rampas del estudio 3.

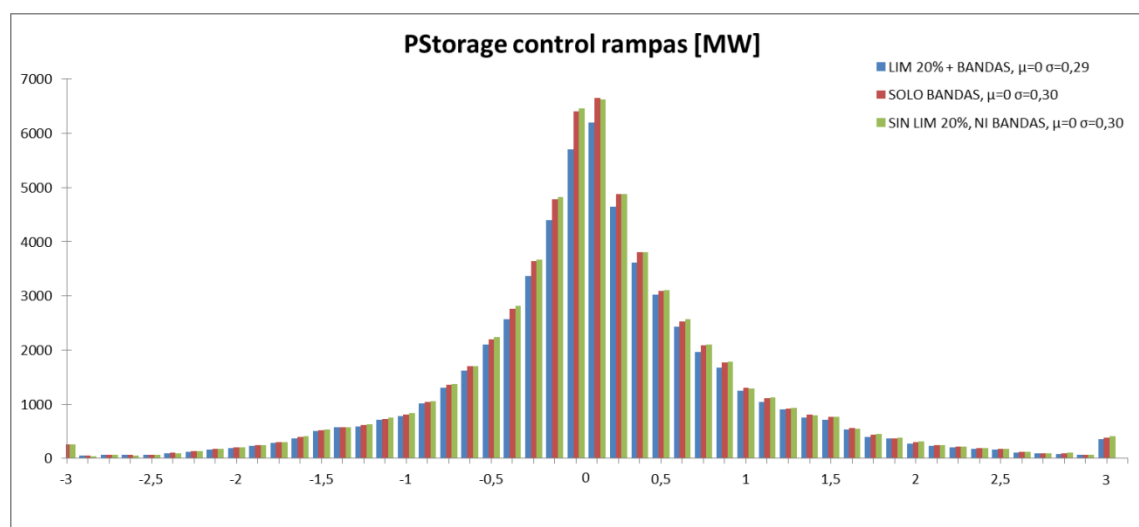
A pesar de que en la Ilustración 9.3 se observan en los extremos del histograma variaciones de potencia aisladas tras el paso del sistema por la batería, la realidad es que, como efectivamente muestran las desviaciones estándar de los mismos, los histogramas se estrechan cuando el sistema de control funciona y lo hace con menos restricciones. Estas variaciones extraordinarias deben obviarse, teniendo en consideración la escala logarítmica del eje de ordenadas.

Como análisis más exhaustivo de la disminución de las desviaciones estándar de los histogramas, se presenta la Tabla 9.7. En ella se representa cómo van “incluyéndose” las variaciones de potencia, en términos porcentuales, dentro de los intervalos  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$  y  $\pm 15\%$ . Con el uso de la batería, puede conseguirse que casi la totalidad de las fluctuaciones se mantengan dentro del rango de tolerancia del 5% que se había propuesto.

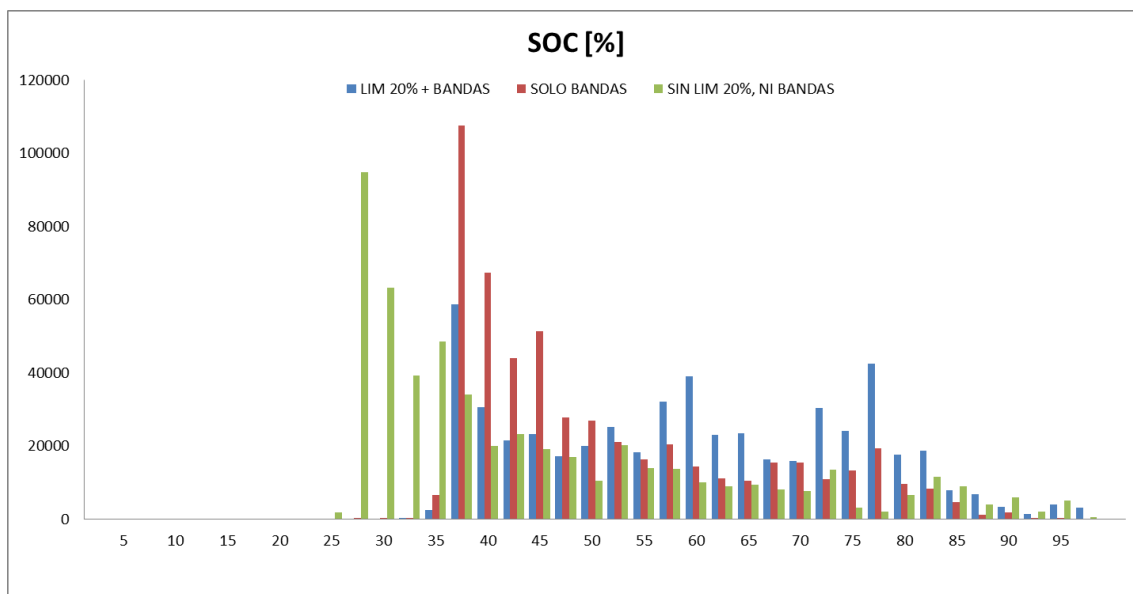
	PARQUE SIN ALMTO.		LIM 20% + BANDAS		SOLO BANDAS		SIN LIM 20%, NI BANDAS	
<b>[-5, 5]</b>	470.321	89,48%	518.985	98,74%	522.834	99,47%	523.814	99,66%
<b>(-10,10]</b>	513.106	97,62%	524.774	99,84%	525.024	99,89%	525.108	99,91%
<b>(-15,15]</b>	522.205	99,35%	525.296	99,94%	525.372	99,96%	525.375	99,96%

**Tabla 9.7** Fluctuaciones incluidas dentro de los intervalos [-5, 5], (-10, 10] y (-15, 15] en escenario de control de rampas del estudio 3.

Si bien es cierto que la batería está sobredimensionada, se desprende de las ilustraciones Ilustración 9.16 y Ilustración 9.17 que con rangos de potencia y energía menores también podría conseguirse dicho objetivo. Así, poniendo siempre como referencia el 15% de la potencia nominal expuesto en la literatura, en este caso la batería de 2.25 MW de potencia absorbería el 99,65% de los eventos.



**Ilustración 9.16** Histograma de potencia de la batería en el escenario de control de rampas de potencia del estudio 3, excluidos los valores  $P_s=0$ .



**Ilustración 9.17** Histograma de SOC de la batería para las tres estrategias en el escenario de control de rampas de potencia del estudio 3.

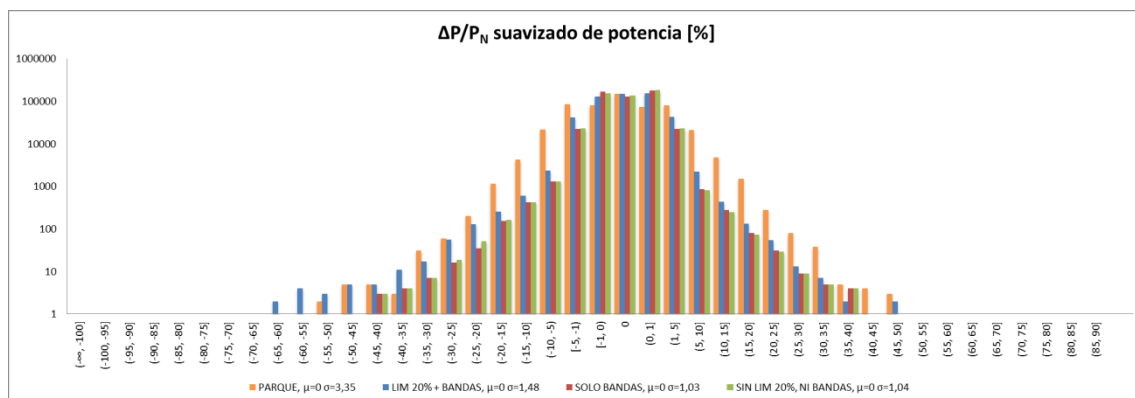
En el caso del SOC es más complicado cuantificarlo, pero en su histograma se observa claramente que el sistema está también sobredimensionado en términos de energía, ya que la mayoría del tiempo este se encuentra concentrado alrededor de los mismos niveles.

### Suavizado de potencia inyectada en red con estatismo de $\tau=10$ minutos

Inherentemente a su definición, en el escenario de suavizado de la potencia inyectada a la red el uso de la batería en términos energéticos es mucho más elevado que en el caso del control de rampas. Los resultados que se han obtenido en el caso del estudio del parque de Barásoain completo son los que aparecen en la Tabla 9.8.

	LIM 20% + BANDAS	SOLO BANDAS	SIN LIM 20%, NI BANDAS
NÚMERO DE CICLOS	25.978	36.891	34.563
% VIDA BATERÍA USADA	21,65%	29,40 %	29,02 %
ENERGÍA TRASEGADA CARGA	1.728 MWh	2.192MWh	2.250 MWh
ENERGÍA TRASEGADA DESCARGA	1.399 MWh	1.775 MWh	1.822 MWh

**Tabla 9.8** Principales resultados simulación parque completo escenario suavizado de potencia.

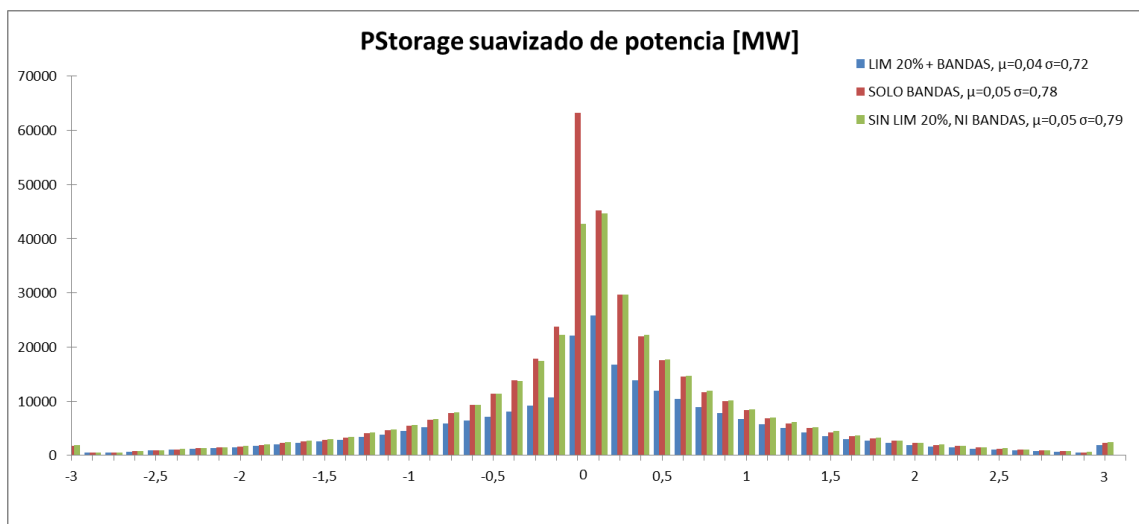


**Ilustración 9.18** Histograma de fluctuaciones en la potencia inyectada en red para todas las estrategias implementadas en el escenario de suavizado de potencia del estudio 3.

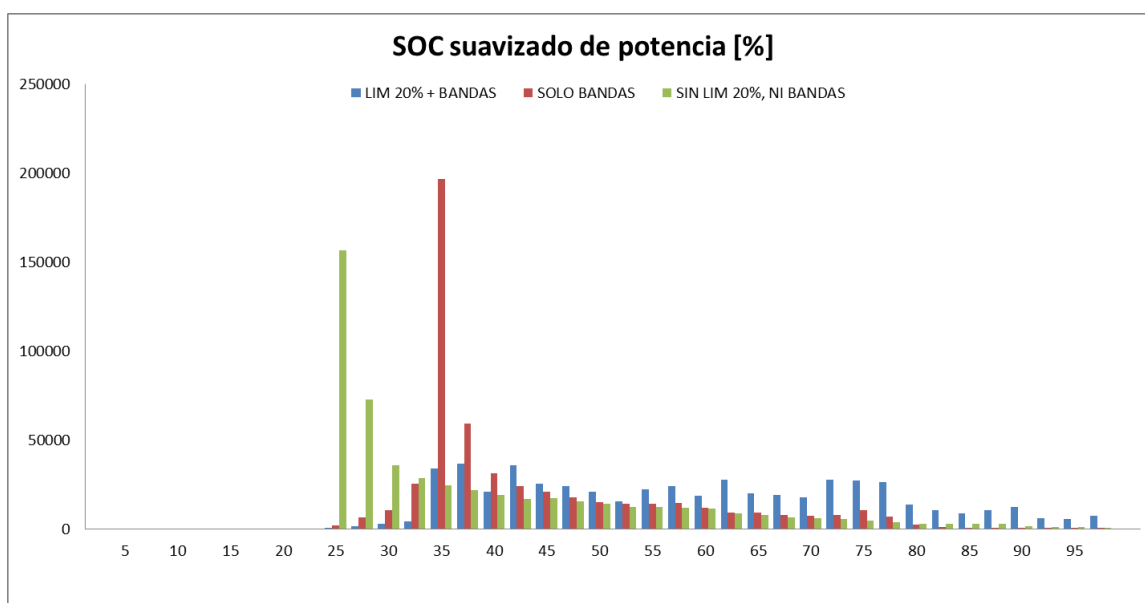
Sin embargo, este mayor consumo energético de la batería tiene su lado positivo en el control de las fluctuaciones de potencia eólica. Como puede desprenderse de la comparación en las desviaciones típicas, el filtrado de la curva de la potencia inyectada en la red constituye un estrechamiento mucho mayor del histograma de las fluctuaciones que en el caso del control de rampas. De hecho, en la Tabla 9.9 se ha añadido a los intervalos anteriores el  $\pm 1\%$  y puede verse cómo una constante de tiempo de  $\tau=10$  minutos, que recordemos que equivaldría a un control de rampas de alrededor del 6%, puede comprimir hasta más del 90% de las fluctuaciones dentro del rango  $\pm 1\%$ .

	PARQUE SIN ALMTO.		LIM 20% + BANDAS		SOLO BANDAS		SIN LIM 20%, NI BANDAS	
<b>[-1, 1]</b>	305.897	58,20%	433.620	82,50%	477.381	90,83%	476.354	90,63%
<b>[-5, 5]</b>	470.321	89,48%	519.247	98,79%	522.387	99,39%	522.423	99,40%
<b>[-10,10]</b>	513.106	97,62%	523.850	99,67%	524.546	99,80%	524.551	99,80%
<b>[-15,15]</b>	522.205	99,35%	524.894	99,87%	525.244	99,93%	525.226	99,93%

**Tabla 9.9** Fluctuaciones incluidas dentro de los intervalos  $[-1, 1]$ ,  $[-5, 5]$ ,  $[-10, 10]$  y  $[-15, 15]$  en escenario de suavizado de potencia del estudio 3.



**Ilustración 9.19** Histograma de potencia de la batería en el escenario de suavizado de potencia del estudio 3, excluidos los valores  $P_s=0$ .



**Ilustración 9.20** Histograma de SOC de la batería para las tres estrategias en el escenario de suavizado de potencia del estudio 3.

De los histogramas de potencia y energía de la batería podemos sacar varias conclusiones. Primero, la introducción de la limitación del 20% parece ser beneficiosa en este caso, ya que las desviaciones estándar de las muestras no aumentan y además sí que se reducen considerablemente el número de ocasiones en los que la batería se utiliza (aproximadamente un 10% de su vida útil).

Segundo, cabe destacar la ligera variación de la media en el caso del suavizado de potencia. En este caso, la media de la muestra gira en torno al 0,05 en lugar de rondar el 0 (un 5% de desviación). Cabe preguntarse si esto indica una tendencia del sistema a cargarse muy ligeramente a medida que transcurren los años.

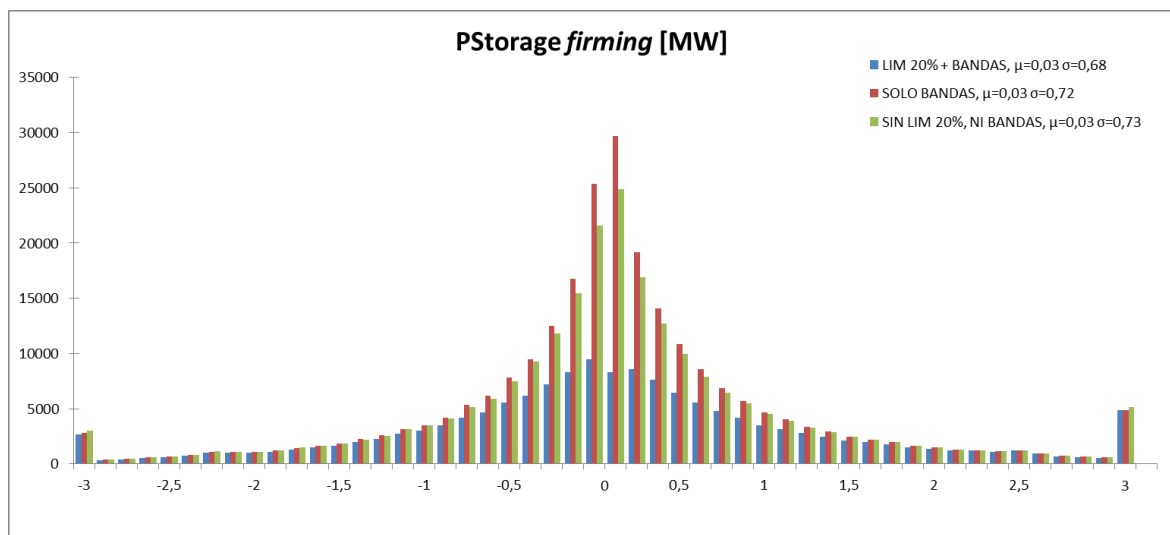


Por otro lado, el SOC parece comportarse de manera más uniforme y con mayor aprovechamiento de la capacidad en el caso en el que existe limitación del 20.

### **Firming de potencia**

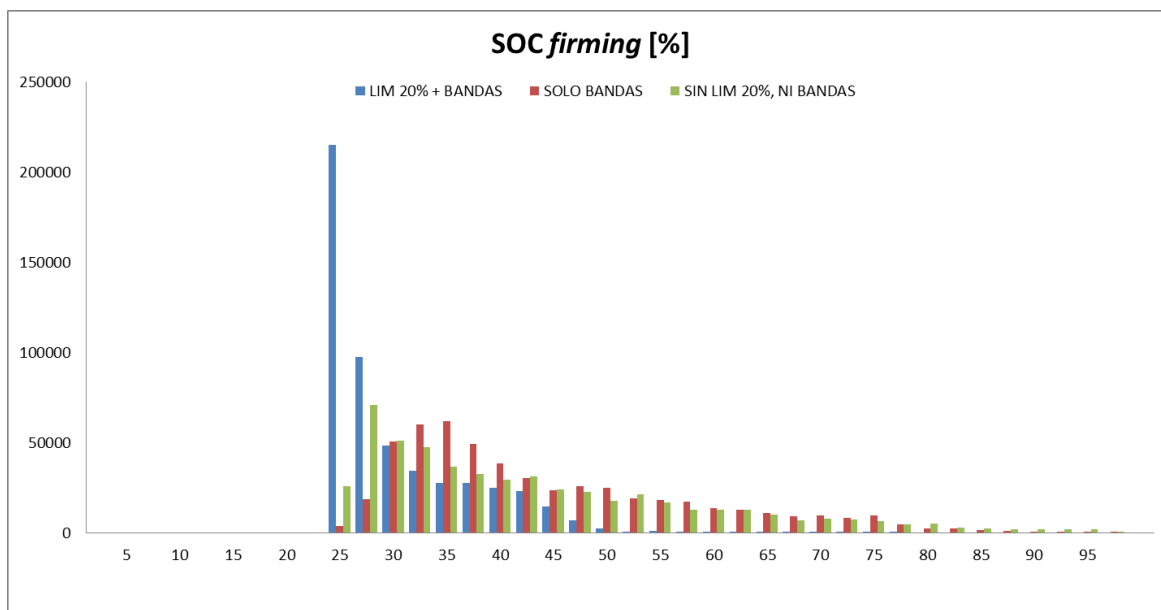
De nuevo esta vez el estudio se centra únicamente en el uso que se hace en sí de la batería, ya que se considera que la manera de comprobar la bondad de la estrategia de aseguramiento de potencia consiste en el estudio de la evolución temporal del sistema y esto deberá llevarse a cabo de manera continuada, a la vez que se produce el control, en el caso de implementarse dicha solución.

El primer punto que sorprende es la aparición de un gran número de eventos en los extremos del histograma de la potencia de la batería. Esto es un indicador de que la batería puede no estar tan sobredimensionada para el control del aseguramiento de potencia como en el resto de los casos. Cabe recordar en este punto que la batería que se ha implementado en el estudio del parque completo es de 3 MW, lo que constituye el 20% de la potencia nominal del parque, frente al 67% que suponen los 2 MW del escenario de máquina aislada.



**Ilustración 9.21** Histograma de potencia de la batería en el escenario de *firming* de potencia del estudio 3, excluidos los valores  $P_s=0$ .

Sin embargo, analizando los datos de dicho histograma, se observa que, teniendo en consideración únicamente el rango de potencias  $\pm 2,25$  MW como se ha hecho anteriormente, el 96% de los eventos se encuentran siempre en dicho intervalo.



**Ilustración 9.22** Histograma de SOC de la batería para las tres estrategias en el escenario de *firming* de potencia del estudio 3.

## Conclusiones

Algunas de las conclusiones que permite obtener este segundo estudio son:

- La restricción del 20% de la potencia nominal como límite de acción de la batería reduce el uso de la batería, en términos de energía que fluye a través de sus celdas, en un 7.23% en el control de rampas y en un 29.58% en el caso del filtrado de la curva de potencia inyectada a red. Esto puede constituir un factor muy importante, que debe ser tenido en cuenta a la hora de plantearse la viabilidad económica de un sistema de almacenamiento, en términos de amortización, y la duración del sistema dentro de un rendimiento técnico óptimo.
- En el control de rampas de potencia, el tiempo de incumplimiento se eleva con el uso de esta restricción del 20%, pero tan solo hasta un 1%. La eliminación de esta limitación garantiza, con esta batería sobredimensionada, el cumplimiento de los requerimientos en el 100% de los casos.
- Un aspecto llamativo es la gran diferencia que se encuentra en la energía trasegada a través de la batería y su vida útil en función de si la estrategia de control es un control de rampas o un filtrado de la potencia.
- Sin embargo, también es cierto que una constante de tiempo de  $\tau=10$  minutos, que recordemos que equivaldría a un control de rampas de alrededor del 6%, puede comprimir hasta más del 90% de las fluctuaciones dentro del rango  $\pm 1\%$ , y prácticamente la totalidad de los casos en el intervalo  $\pm 5\%$ .
- Tal como se ha publicado en la literatura, una batería con una potencia del 15% de la potencia nominal del parque será capaz de absorber el 96% de los

eventos de carga o descarga en el peor de los casos (*firming*) y hasta un 99,65% en el caso del filtrado, donde se requieren de más ciclos de carga y descarga pero de menor profundidad

### 9.3 Comparativa

Este apartado constituye probablemente la clave del presente Proyecto Final de Carrera. Aquí se pretende comprobar principalmente si, tal como se presume, el control del parque entero es menos exigente que si se realiza máquina a máquina a máquina y, además, cuál es la viabilidad de utilizar una estrategia u otra en función de si se controla la turbina aisladamente o todas en su conjunto.

Durante este apartado, para evitar confusiones, se utilizará la nomenclatura R1, R2 y R3 para los diferentes casos de control de rampa, Fil1, Fil2 y Fil3 para el filtraje y Fir1, Fir2 y Fir3 para el aseguramiento de potencia. En caso de duda comprobar la Tabla 9.10.

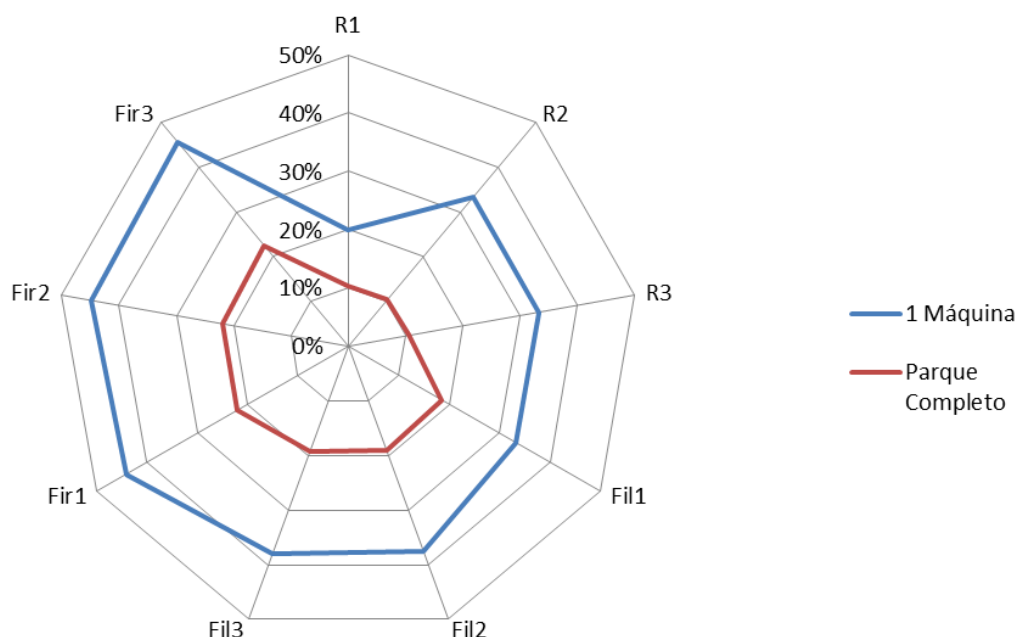
Para establecer un criterio que sirva de comparación para todos los escenarios – control de rampas, suavizado de potencia y *firming*- utilizaremos como parámetro de contraste el porcentaje con respecto a la potencia nominal necesario para absorber el 99% de los eventos de potencia. Es decir, evaluando los diferentes histogramas de  $P_{Storage}$ , se contabiliza en qué intervalo se encuentran el 99% de los casos. Esto se muestra en la Tabla 9.10, donde algunos de los datos se han calculado mediante interpolaciones lineales.

			1 MÁQUINA	PARQUE COMPLETO
RAMPAS	R1	LIM 20% + BANDAS	20%	10,2%
	R2	SOLO BANDAS	33,33%	10,4%
	R3	SIN LIM 20%, NI BANDAS	33,33%	10,5%
FILTRAJE	Fil1	LIM 20% + BANDAS	33,33%	18,61%
	Fil2	SOLO BANDAS	37,5%	19,1%
	Fil3	SIN LIM 20%, NI BANDAS	37,9%	19,3%
FIRMING	Fir1	LIM 20% + BANDAS	44,1%	22%
	Fir2	SOLO BANDAS	44,9%	22%
	Fir3	SIN LIM 20%, NI BANDAS	45,7%	22,4%

**Tabla 9.10** Porcentaje de potencia, con respecto a la potencia nominal, necesaria para absorber el 99% de los eventos de carga o descarga, en todos los casos estudiados.

En la Ilustración 9.23 se puede apreciar de manera más gráfica las diferencias mostradas en la tabla. El escenario menos exigente a nivel de potencia sería el control

de rampas de potencia con una estrategia de parque completo y el más exigente el aseguramiento de potencia de una única máquina.

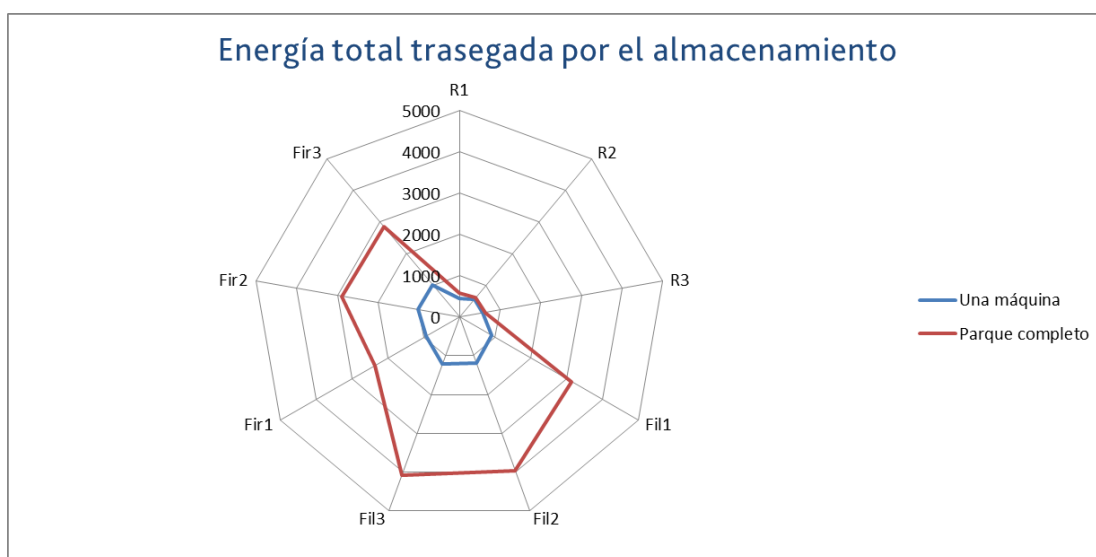


**Ilustración 9.23** Porcentaje de potencia, con respecto a la potencia nominal, necesaria para absorber el 99% de los eventos de carga o descarga, en todos los casos estudiados.

Para comparar todos los casos en términos de energía, se utiliza como criterio la energía total que fluye a través de la batería a lo largo del año completo. De estos resultados se desprenden ciertas conclusiones interesantes. En primer lugar, se observa cómo la diferencia en términos de energía entre un control de rampas a una máquina aislada y a un parque es mínima. Sin embargo, en los casos de filtrado y *firring* el gradiente es entre 3 y 4 veces mayor. Esto es lógico, ya que, como se viene viendo a lo largo de todo el estudio, el control del filtrado y del aseguramiento de potencia son aspectos que tienen, en proporción, mayores requerimientos de energía que de potencia.

		Una máquina			Parque completo		
		carga	descarga	total	carga	descarga	total
Rampas	R1	250,61	202,42	453,03	325,53	263,24	588,77
	R2	313,49	253,72	567,21	343,73	278,45	622,18
	R3	312,66	253,04	565,7	347,09	281,35	628,44
Filtraje	Fil1	492,82	398,73	891,55	1.728,72	1.399,93	3128,7
	Fil2	656,54	531,85	1188,4	2.192,45	1.775,69	3968,1
	Fil3	667,6	540,92	1208,5	2.250,53	1.822,64	4073,2
Firming	Fir1	517,98	419,84	937,82	1.309,47	1060,98	2370,4
	Fir2	565,09	457,99	1023,1	1594,01	1291,45	2885,5
	Fir3	561,77	455,37	1017,1	1576,76	1277,49	2854,2

**Tabla 9.11** Datos de energía trasegada por la batería para todos los casos estudiados en MWh.



**Ilustración 9.24** Energía total trasegada por la batería en todos los casos estudiados en MWh.

Otro aspecto a destacar tiene como foco la limitación introducida de que el sistema generador se encuentre en valores de al menos el 20% de potencia nominal para que el almacenamiento entre en funcionamiento. Se ha observado que las desviaciones derivadas de este concepto son sobresalientes en el caso de una máquina aislada, pero que sin embargo tiene un menor impacto cuando el control se realiza a nivel de parque completo. Por ejemplo, el tiempo de incumplimiento en el caso de las rampas aumenta únicamente en un 1% en el caso del parque completo, mientras que controlando solo una máquina aumenta hasta en 35 veces.

Por resumir, se pueden extraer las siguientes conclusiones de la comparativa entre los estudios 2 y 3:

- El porcentaje de potencia, con respecto a la potencia nominal, necesaria para absorber el 99% de los eventos de carga y descarga es sensiblemente menor en el caso de realizarse el control del parque completo.
- En el caso del control de rampas, la energía que fluye a través de la batería no aumenta de manera sustancial en caso de controlar el parque completo de Barásoain (15 MW de potencia nominal) en comparación con una única máquina (3 MW).
- La limitación del 20% de la potencia nominal para que el almacenamiento entre en funcionamiento puede considerarse beneficioso en caso del parque completo, pero no en el caso de una única máquina.

## 10.RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En este capítulo se pretende concentrar y resumir los resultados y conclusiones que aporta este Proyecto Fin de Carrera. Aunque a lo largo de todas las páginas anteriores se han ido desprendiendo alguna de estas ideas, es recomendable realizar un análisis global de lo que constituye este estudio.

En primer lugar, el estudio macroscópico del escenario mundial de la energía eólica hace indicar que esta va a gozar cada vez de mayor importancia dentro del mix energético. Añadiendo a esto el carácter fluctuante de la velocidad del viento y la potencia eléctrica que genera, realizar un esfuerzo conjunto en el desarrollo tanto de sistemas de almacenamiento como de predicción resulta de gran interés para solucionar esta coyuntura.

Existen ciertos factores externos como pudieran ser el efecto de agregación de máquinas en parque eólicos y el control de las turbinas que colaboran en el control de las fluctuaciones de potencia. Sin embargo, este Proyecto Fin de Carrera demuestra que en el caso del parque eólico de Barásoain el carácter asintótico del efecto de agregación de máquinas no es suficiente para el control de las variaciones de potencia, por lo que la inclusión de un sistema de almacenamiento puede considerarse como una solución real a la solución de este problema.

La conclusión principal que arroja este estudio es que con un único sistema de almacenamiento, bien diseñado y con los algoritmos de control adecuados, es posible controlar tres estrategias diferentes como son el control de rampas, el suavizado de potencia y el *firmiting* de potencia. Esto supone que no existe necesidad de utilizar diferentes almacenamientos para cada funcionalidad y que, una vez implementado, pueden realizarse modificaciones estratégicas de manera sencilla y barata.

El uso de bandas de control del SOC implica mayor tiempo de incumplimiento de los requerimientos, pero se prolonga la vida útil del sistema. Por lo tanto, ha de concluirse que la inclusión de bandas de modulación no puede considerarse positiva de por sí. Es cierto que se mejora un aspecto importante de la batería como es su vida útil, pero, ante una misma capacidad, limita la habilidad del sistema para absorber fluctuaciones en determinados casos. No obstante, es importante destacar también que se observa que el comportamiento del SOC no varía de forma sustancial si existe o no.

Este Proyecto Fin de Carrera confirma la documentación publicada en la literatura, ya que una batería con una potencia del 15% de la potencia nominal del parque será capaz de absorber el 96% de los eventos de carga o descarga en el peor de los casos (*firmiting*) y hasta un 99,65% en el caso del filtrado, donde se requieren más ciclos de carga y descarga pero de menor profundidad

Otra conclusión importante radica en el hecho de observar que el control de rampas responde más a cuestiones de potencia de la batería, mientras que en los casos de filtraje y *firmiting* la capacidad energética del almacenamiento tiene un peso mayor. Por otro lado, el porcentaje de potencia, con respecto a la potencia nominal, necesaria para absorber el 99% de los eventos de carga y descarga es sensiblemente menor en el caso de realizarse el control del parque completo.

El ahorro en el uso de la batería en el caso de acogerse a los criterios de ciertos códigos de red, que exigen de cumplir los requerimientos exigidos cuando la potencia es menor del 20% de la potencia nominal en la turbina para que la batería funcione resulta importante. Sin embargo, debe estudiarse la conveniencia de seguir cumplir las obligaciones también dentro de este umbral, especialmente en los casos de suavizado de potencia y de *firmiting*. En estos dos casos evitar ceñirse a los requerimientos parece carecer de sentido, en el caso de controlar una máquina de manera aislada, aunque puede considerarse altamente beneficioso en el caso del parque completo.

En datos, este umbral de libre acción por debajo del 20% de la potencia nominal reduce el uso de la batería, en términos de energía que fluye a través de sus celdas, entre un 7% y un 30% según el caso. Esto puede constituir un factor muy importante, que debe ser tenido en cuenta a la hora de plantearse la viabilidad económica de un sistema de almacenamiento, en términos de amortización, y la duración del sistema dentro de un rendimiento técnico óptimo.

Este trabajo también permite afirmar que en el caso de la energía eólica existe una ligera tendencia del sistema de almacenamiento de energía a la carga. Esta tendencia pudiera llegar a compensarse con la disminución del rendimiento de los procesos de carga y descarga de la batería. Una eficiencia baja en la actuación del almacenamiento hará que el sistema se descargue rápidamente y su utilidad en el control sea menor.

En cuanto al tiempo de muestreo utilizado en el estudio, se ha elegido el análisis minutil de los datos por cuestiones de veracidad y capacidad computacional, además de porque así se simplifica el cálculo de ciertos parámetros como las variaciones de potencia y la energía de la batería. Sin embargo, en una presumible ejecución real, el control se realizará al menos cada segundo, lo que también supondrá que las variaciones de potencia estudiadas sean menores.

Para concluir, mencionar que debe tenerse en cuenta que los estudios presentados en esta memoria se han realizado suponiendo un sistema de almacenamiento de potencias simétricas, es decir, las potencias máximas de carga y de descarga son del mismo valor. En un caso real, de tratarse de una batería ion litio, la potencia de descarga máxima sería el doble que la de carga.

## 11. PROPUESTA DE NUEVAS LÍNEAS DE DESARROLLO

Durante la ejecución del estudio expuesto en las páginas precedentes se han ido desprendiendo diferentes temas de interés que, bien por falta de tiempo y recursos o bien por no ser objeto de este Proyecto Fin de Carrera, no se han estudiado en profundidad.

En consecuencia, se proponen futuras líneas de estudio que, *grosso modo*, pueden englobarse en los siguientes tres temas principales:

- La inclusión de un nuevo algoritmo de control, superpuesto a los ya existentes, para el control del estado de carga de la batería en todo momento. Esto permitiría una mejor gestión del sistema de almacenamiento y predicción, pudiendo situar el SOC según la necesidad de carga y descarga prevista por el sistema de predicción. Además, de este modo se podría reducir y ajustar de manera más precisa el dimensionamiento del sistema, con los subsiguientes ahorros en los costes.

NOTA: véase: Grid Integration of Large-Scale PV Plants, Iñigo de la Parra.

- Establecer un sistema aritmético para la predicción de la potencia eólica en función de los datos recogidos anteriormente, mediante procesos gaussianos. Puede servir como referencia el estudio de Duehee Lee, Joonhyun Kim y Ross Baldick, "Ramp Rates Control Of Wind Power Output Using a Storage System and Gaussian Processes".
- Desarrollar el control siguiendo una media móvil, de manera que se minimicen los errores derivados de posibles desconexiones o perturbaciones de los datos.

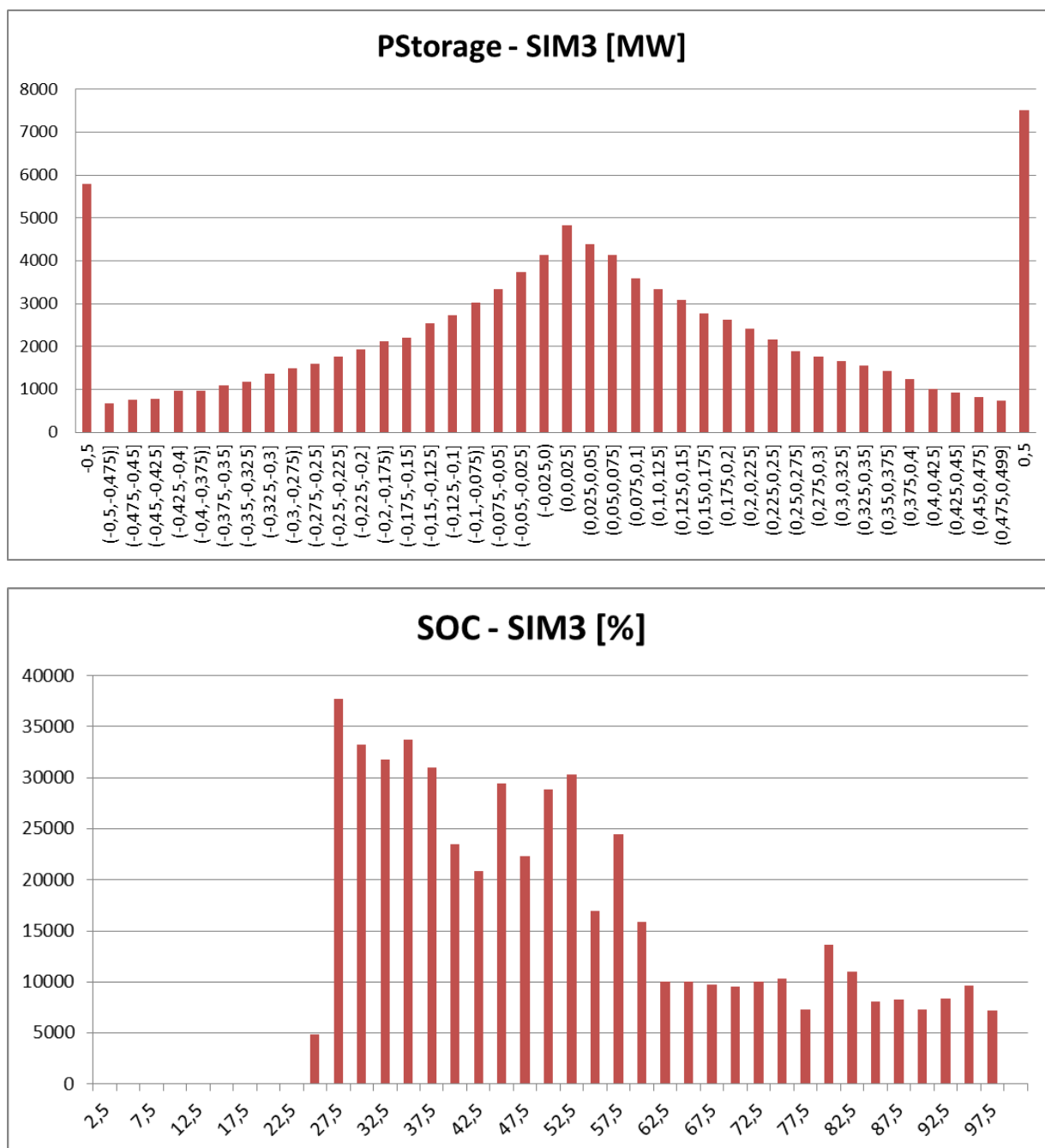


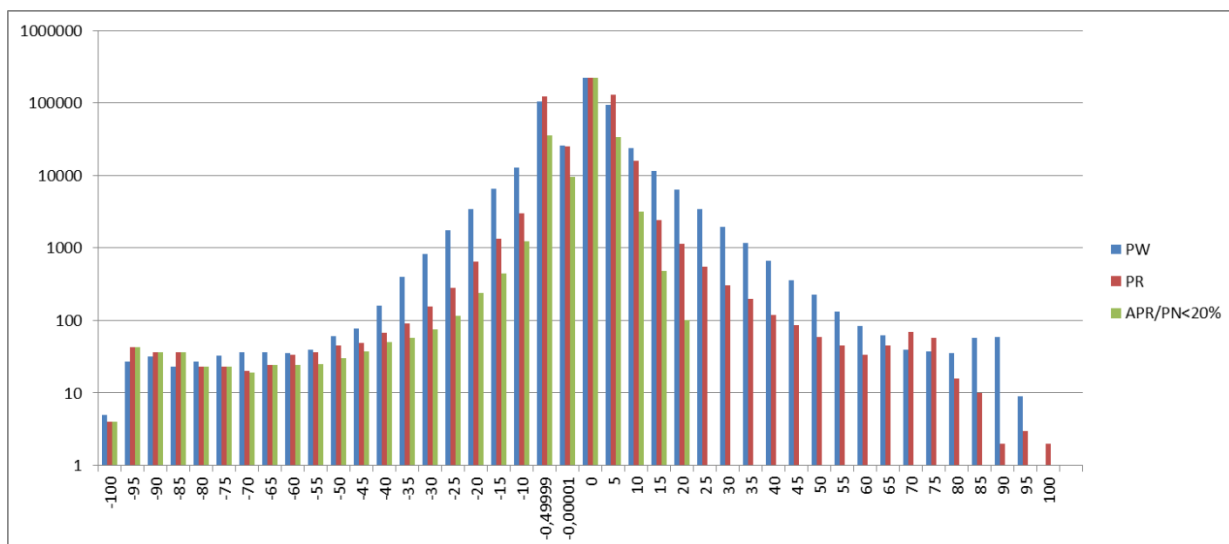
## 12. BIBLIOGRAFÍA

1. Broussely, M. and Pistoia, G. *Industrial applications of Batteries. From Cars to Aerospace and Energy Storage*. Eds. Edsevier 2007.
2. McGowin, C. and Steeley, W. *Wind Power Integration Technology Assessment and Case Studies*. EPRI 2004.
3. Université Libre de Bruxelles, Faculté des Sciences Appliquées, Service BEAMS groupe Energie. *Energy Storage Technologies for Wind Power Integration*. March 2010
4. J. Marcos *et al.* *Storage Requirements for PV Power Ramp-rate Control*. Solar Energy. Oct 2013
5. Parra Laita, Íñigo de la. *Grid Integration of Large-Scale PV Plants*. UPNA. Feb 2015.
6. Lee, D., Kim, J. and Baldick, R. *Ramp Rates Control of Wind Power Output Using a Storage System and Gaussian Processes*. Sept 2012.
7. US Department of Energy. *Grid Energy Storage*. Dec 2013.
8. Publicaciones anteriores surgidas a través de la Cátedra de Energías Renovables.

## ANEXO A: ESTUDIO PRELIMINAR DEL CONTROL DE RAMPAS DE POTENCIA EN UNA MÁQUINA AISLADA

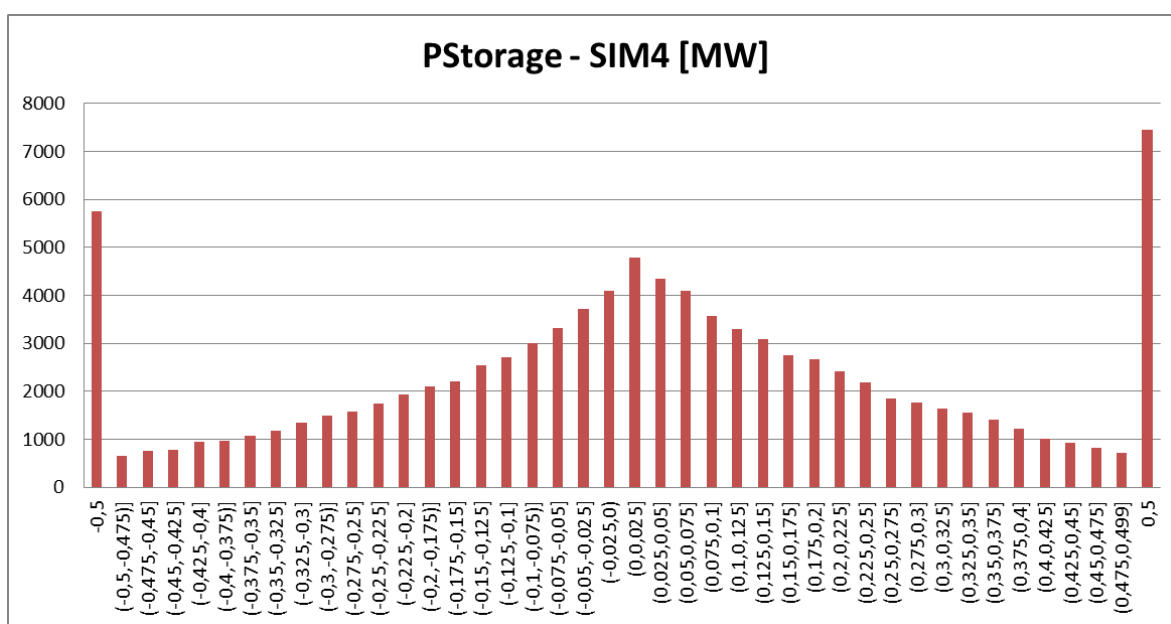
### Simulación 3

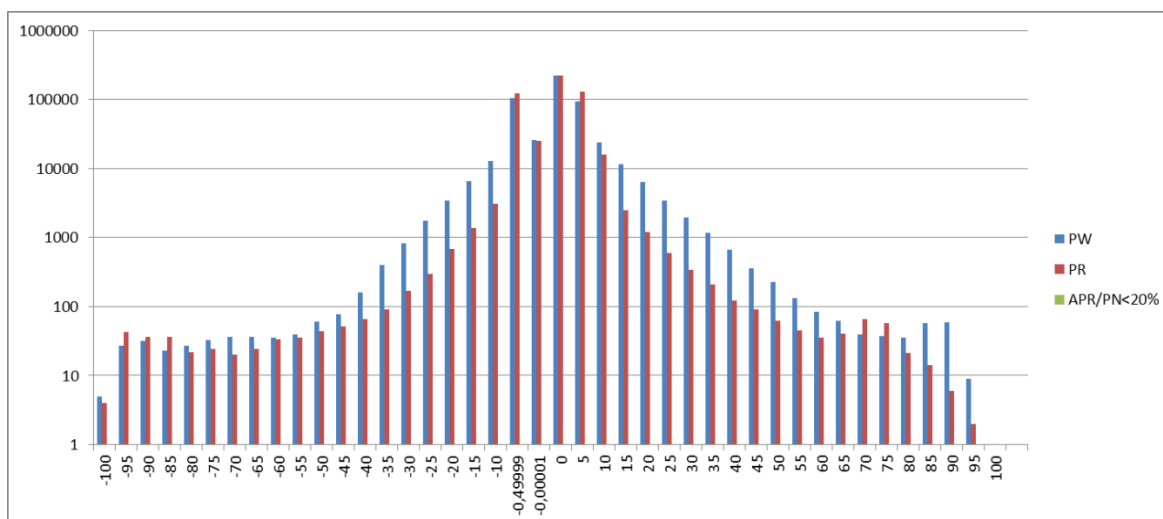
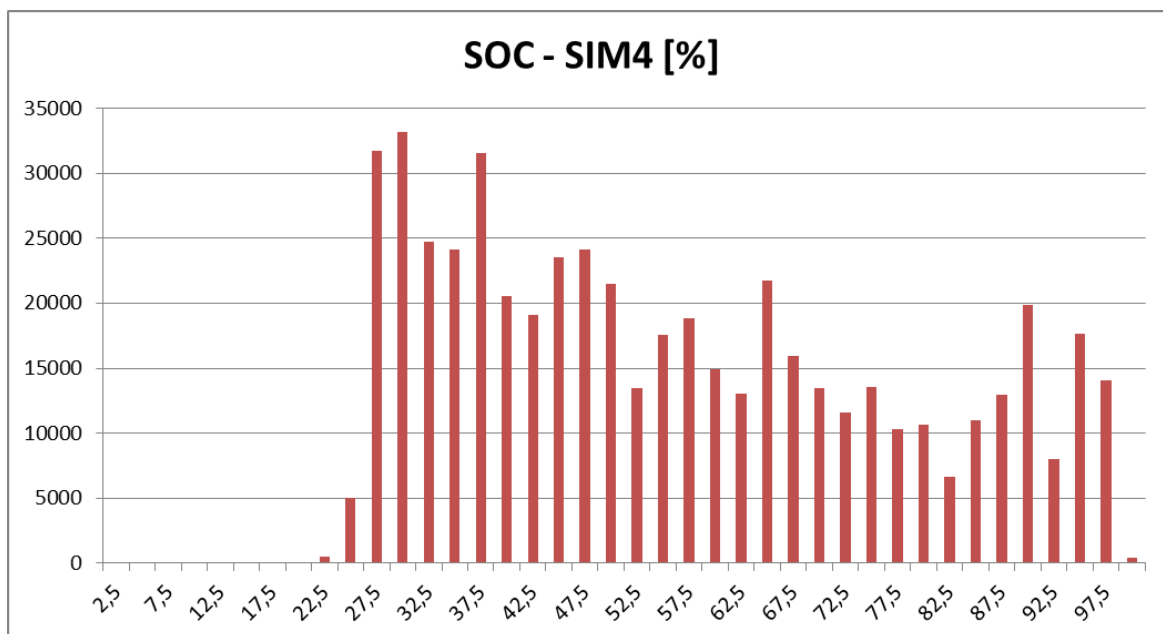




CAPACIDAD REQUERIDA STORAGE	0,36665266
POTENCIA REQUERIDA STORAGE	3,09919671
Nº EVENTOS PLOS	11724
Nº EVENTOS PMIS	13368
ENERGÍA DE CARGA (MWh)	198,776468
ENERGÍA DE DESCARGA (MWh)	160,8977

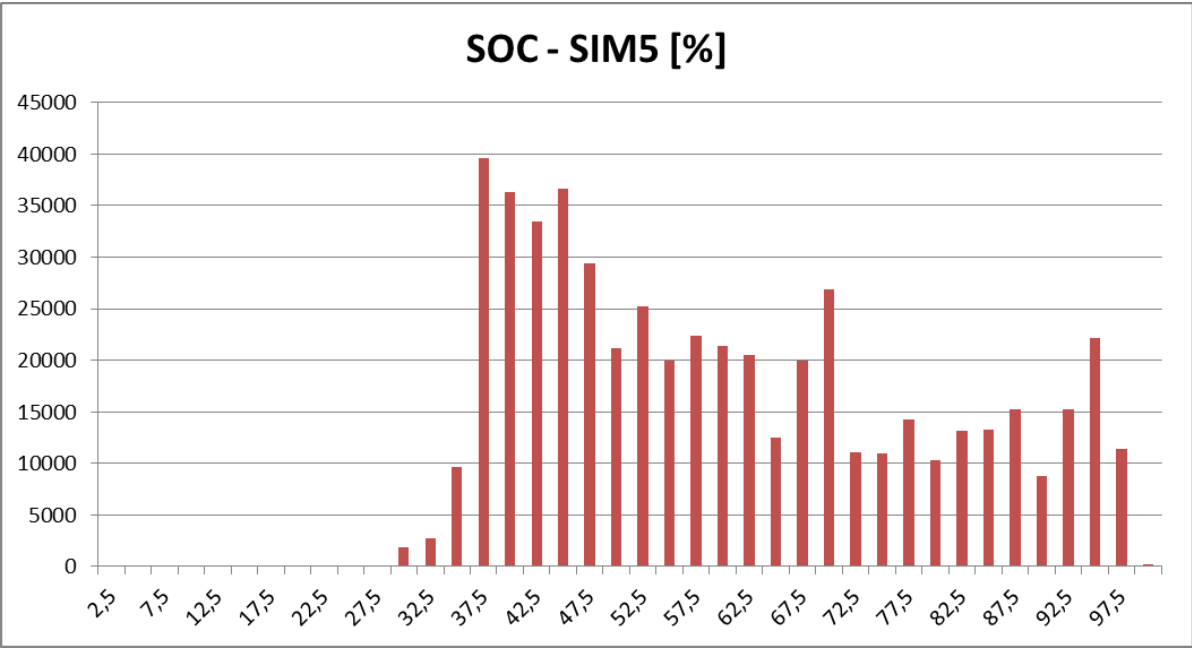
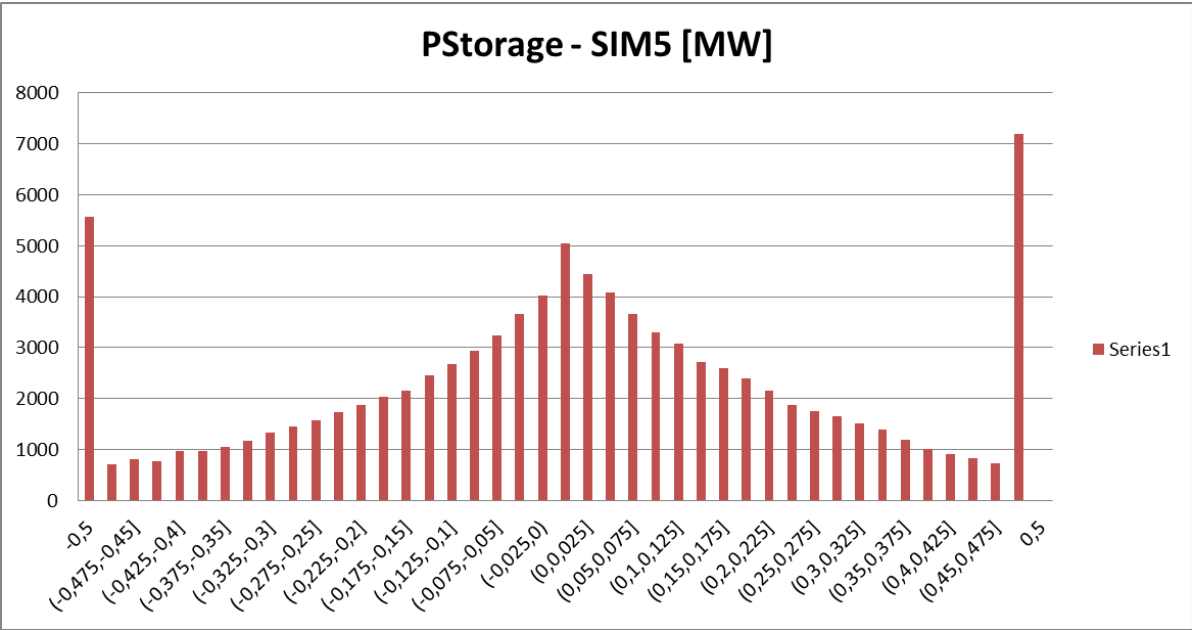
## Simulación 4

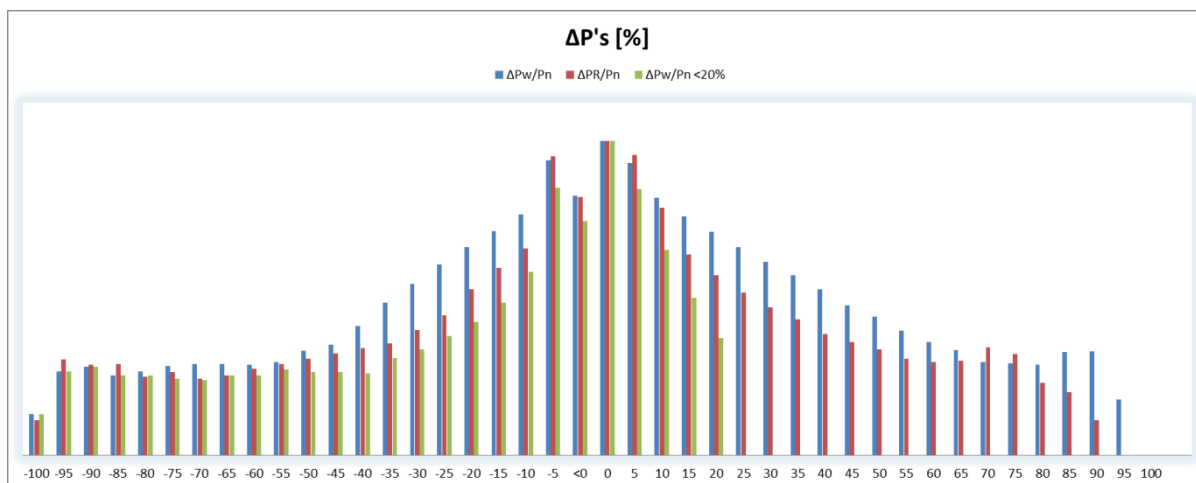




CAPACIDAD REQUERIDA STORAGE	0,19174445
POTENCIA REQUERIDA STORAGE	3,09919671
Nº EVENTOS PLOS	12238
Nº EVENTOS PMIS	13336
ENERGÍA DE CARGA (MWh)	197,415699
ENERGÍA DE DESCARGA (MWh)	159,877042

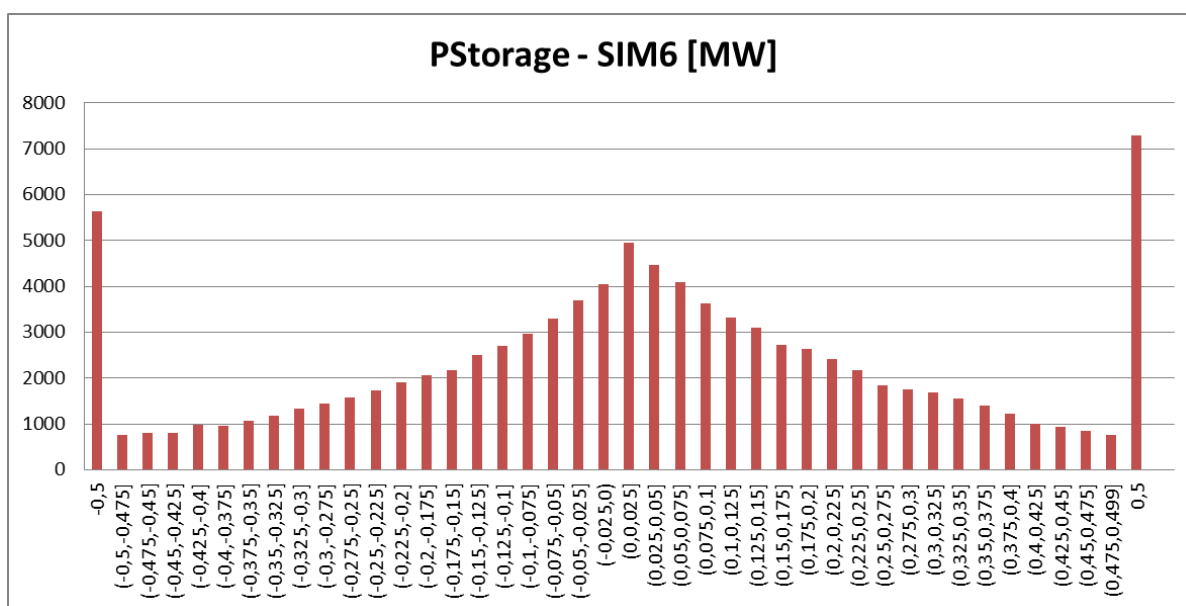
Simulación 5

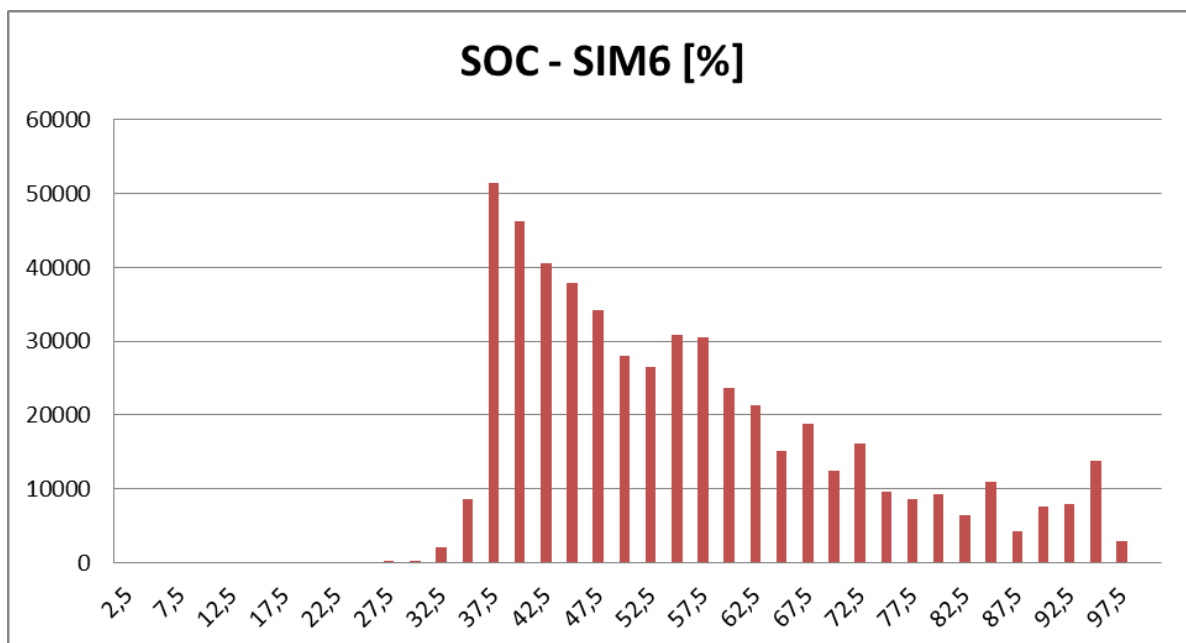




CAPACIDAD REQUERIDA STORAGE	0,18708842
POTENCIA REQUERIDA STORAGE	3,09919671
Nº EVENTOS PLOS	13771
Nº EVENTOS PMIS	15190
ENERGÍA DE CARGA (MWh)	194,8067
ENERGÍA DE DESCARGA (MWh)	157,771944

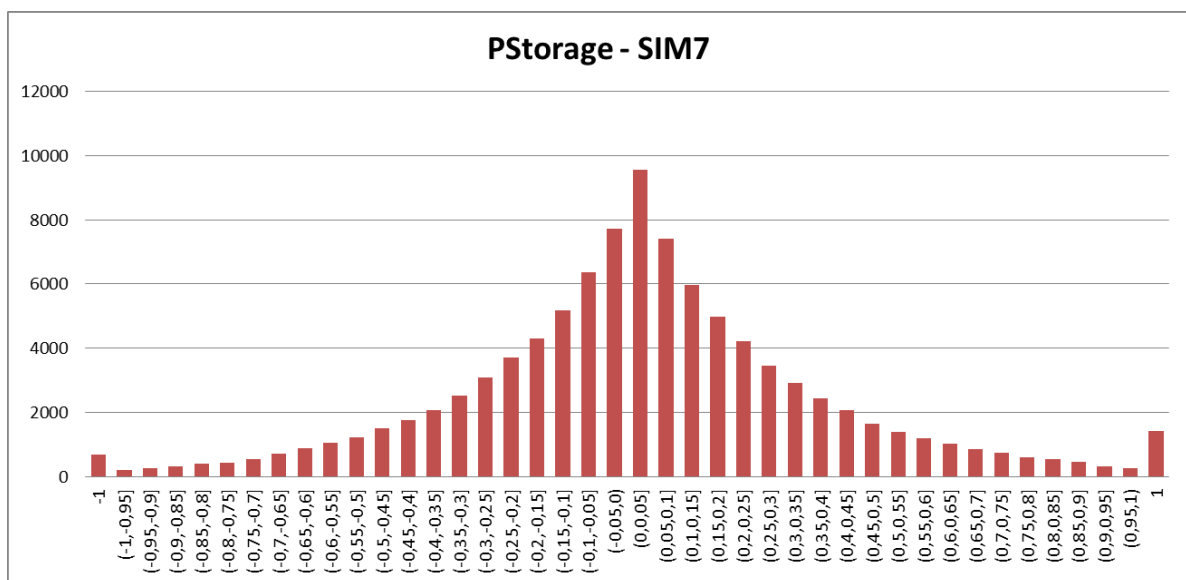
## Simulación 6

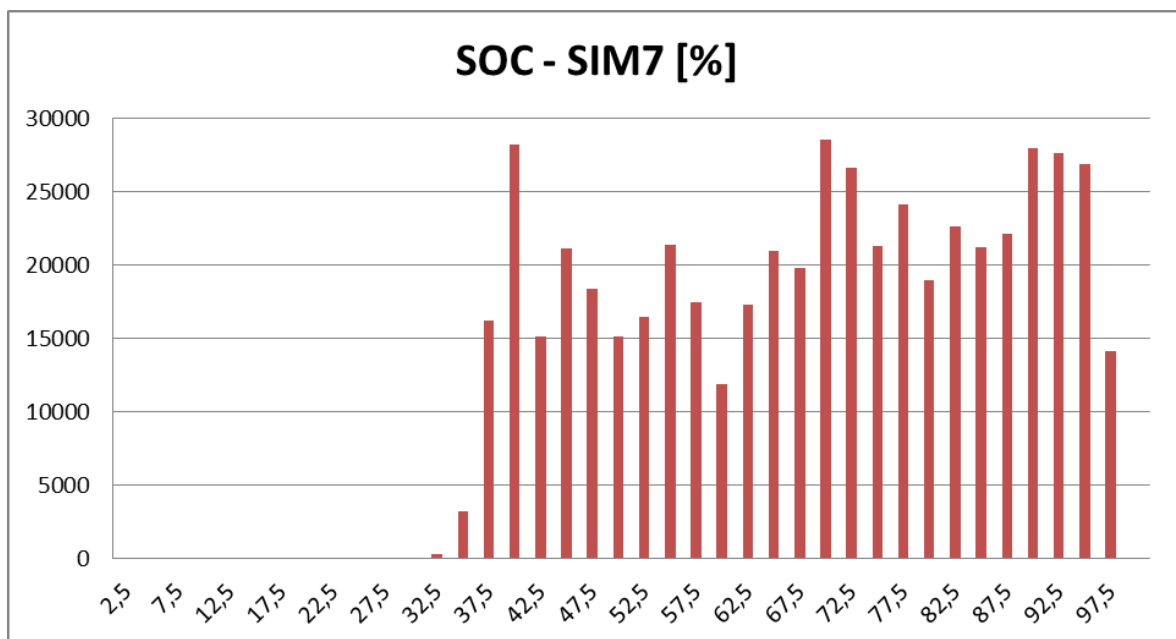




CAPACIDAD REQUERIDA STORAGE	0,34509909
POTENCIA REQUERIDA STORAGE	3,09919671
Nº EVENTOS PLOS	12749
Nº EVENTOS PMIS	14871
ENERGÍA DE CARGA (MWh)	196,891303
ENERGÍA DE DESCARGA (MWh)	159,414334

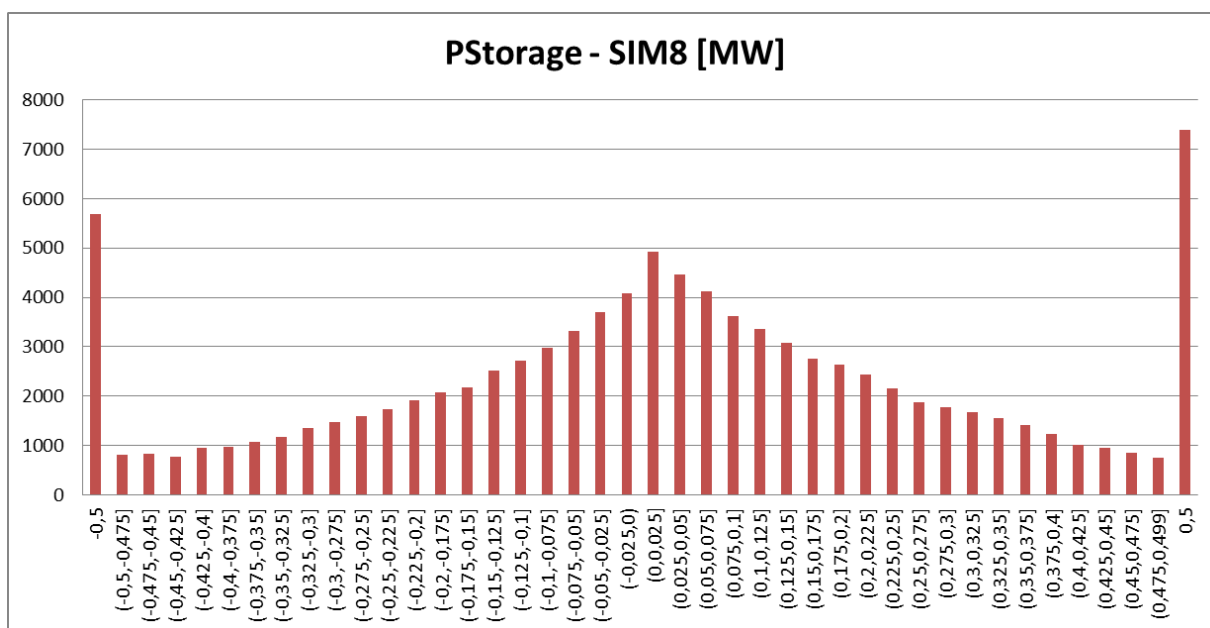
## Simulación 7



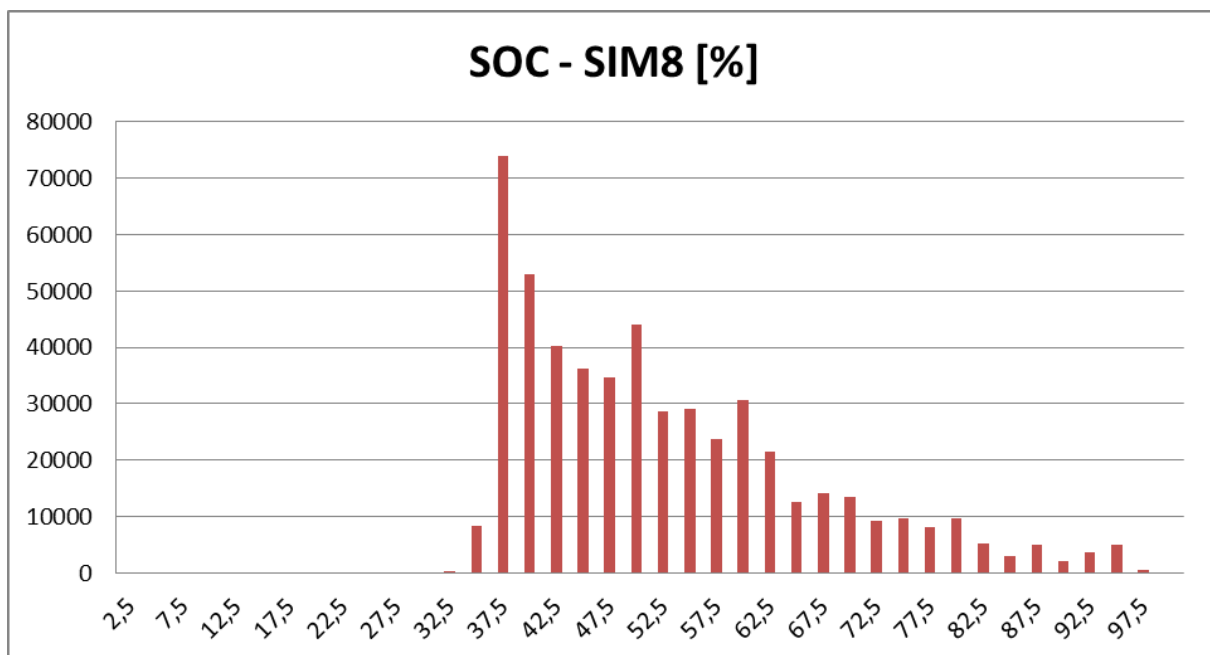


CAPACIDAD REQUERIDA STORAGE	0,35635852
POTENCIA REQUERIDA STORAGE	3,09919671
Nº EVENTOS PLOS	10217
Nº EVENTOS PMIS	8908
ENERGÍA DE CARGA (MWh)	237,000015
ENERGÍA DE DESCARGA (MWh)	191,823006

## Simulación 8

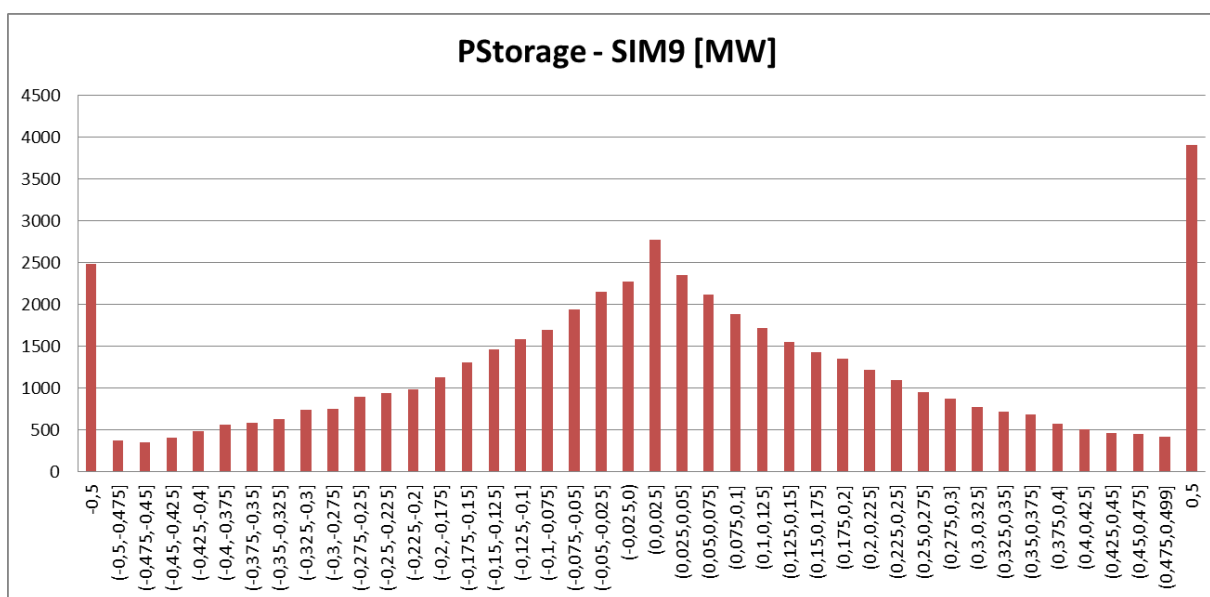


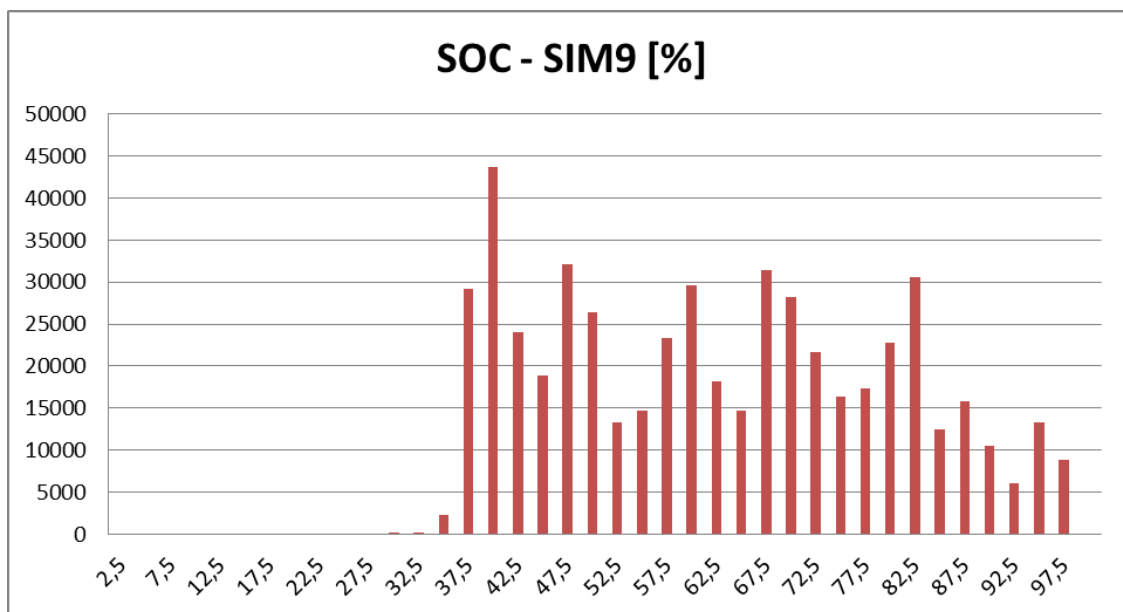




CAPACIDAD REQUERIDA STORAGE	0,64423261
POTENCIA REQUERIDA STORAGE	3,09919671
Nº EVENTOS PLOS	12201
Nº EVENTOS PMIS	14612
ENERGÍA DE CARGA (MWh)	198,183549
ENERGÍA DE DESCARGA (MWh)	160,414966

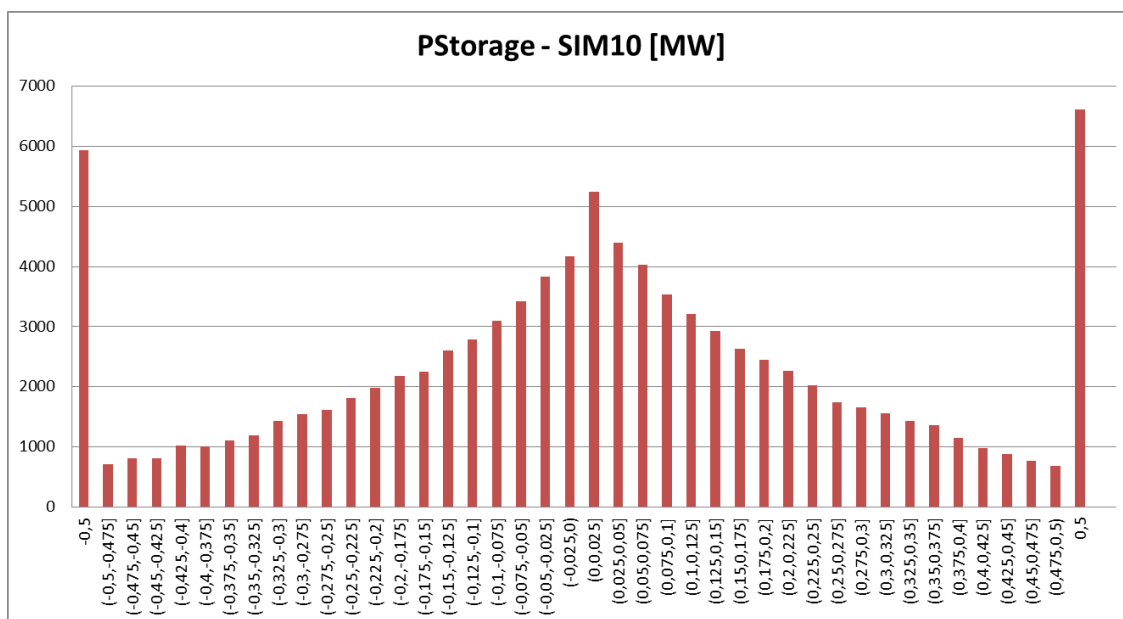
## Simulación 9

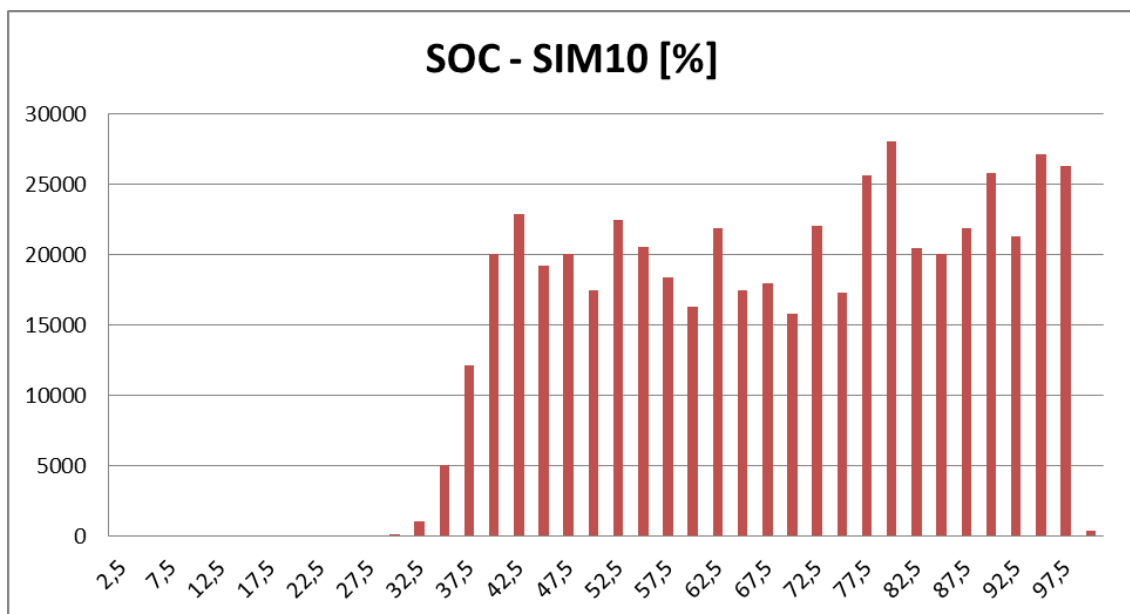




CAPACIDAD REQUERIDA STORAGE	0,33259878
POTENCIA REQUERIDA STORAGE	2,94919671
Nº EVENTOS PLOS	6223
Nº EVENTOS PMIS	5330
ENERGÍA DE CARGA (MWh)	100,921242
ENERGÍA DE DESCARGA (MWh)	81,6180117

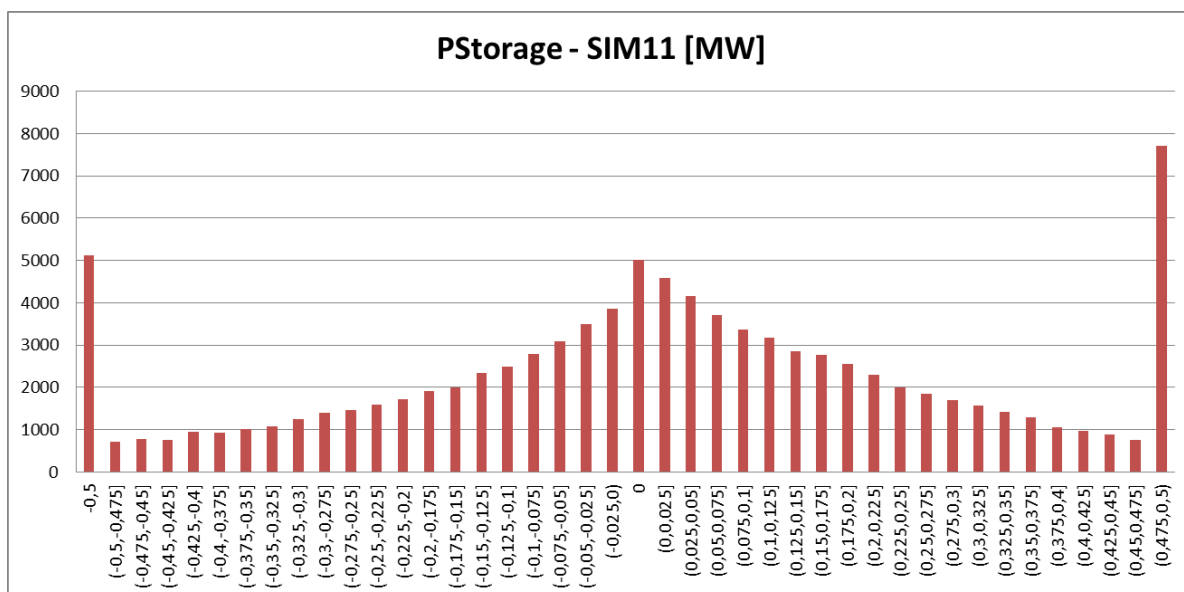
## Simulación 10

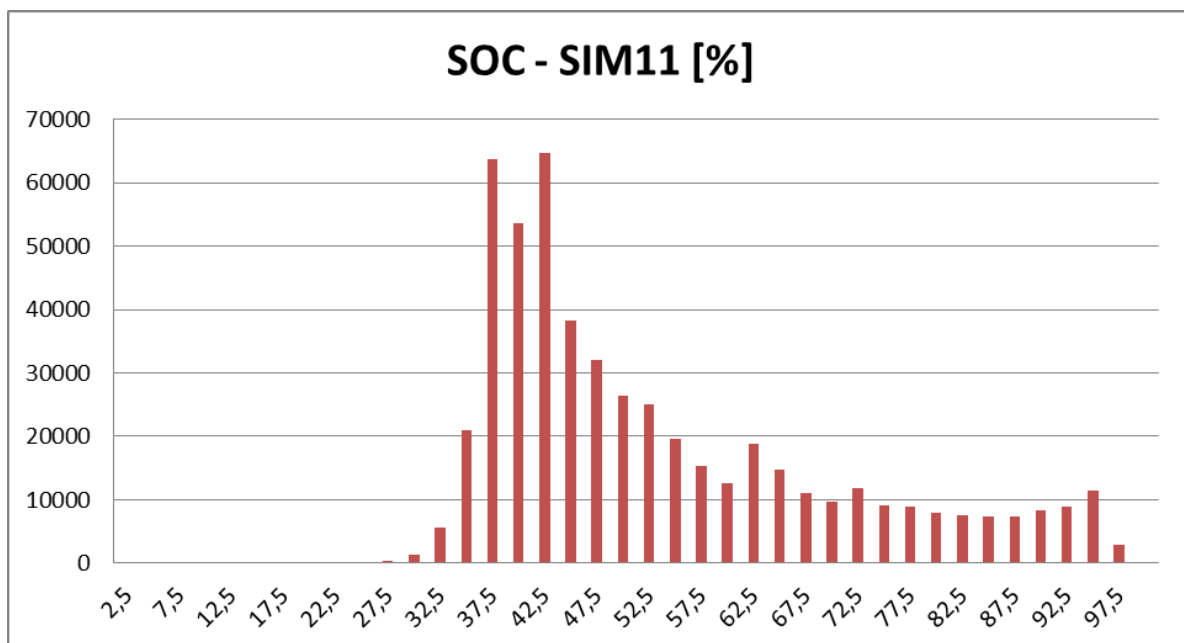




CAPACIDAD REQUERIDA STORAGE	0,1876344
POTENCIA REQUERIDA STORAGE	3,09919671
Nº EVENTOS PLOS	15443
Nº EVENTOS PMIS	14291
ENERGÍA DE CARGA (MWh)	183,626855
ENERGÍA DE DESCARGA (MWh)	165,637231

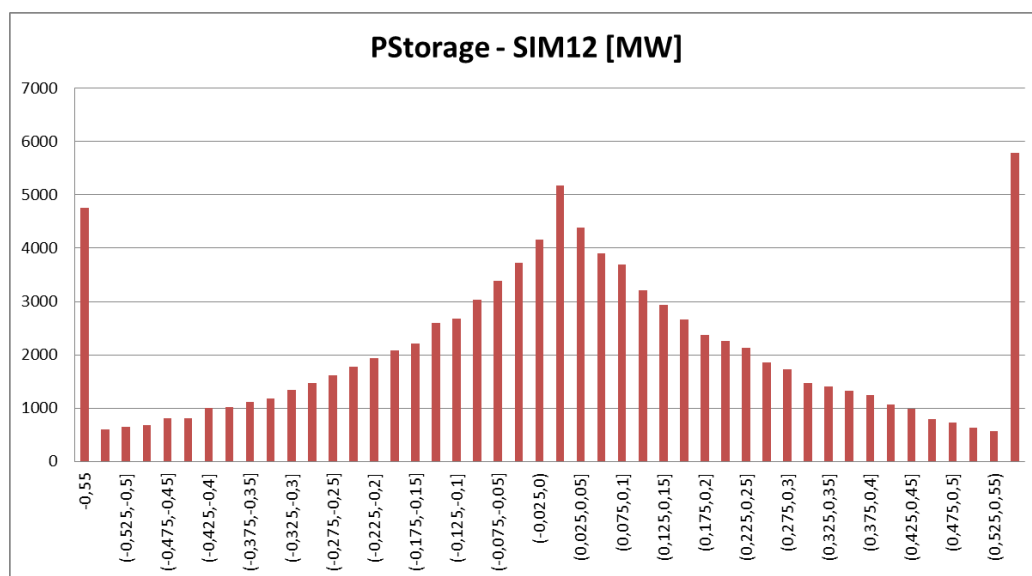
## Simulación 11

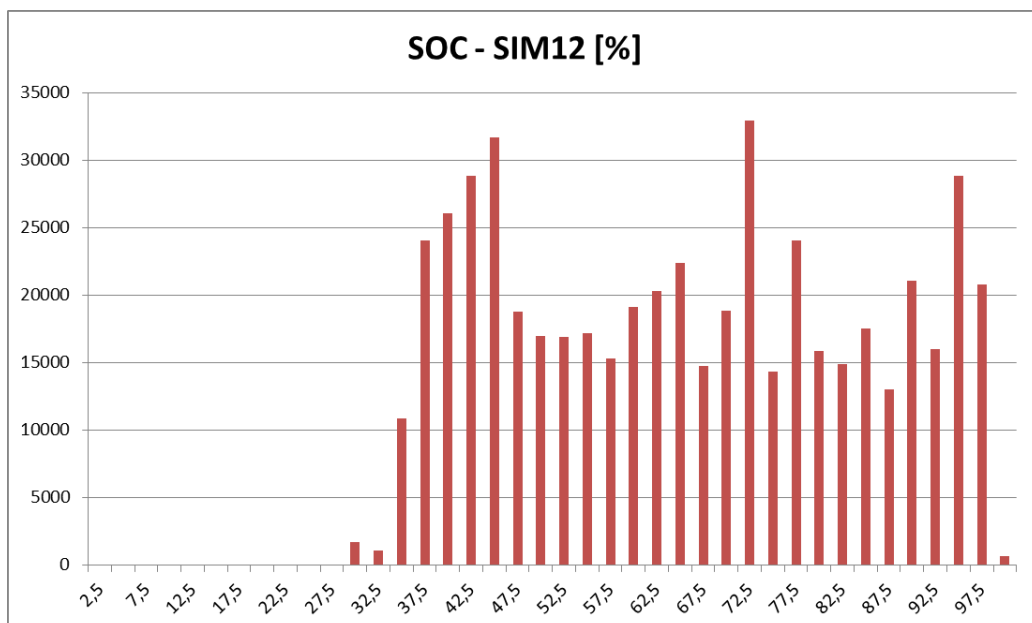




CAPACIDAD REQUERIDA STORAGE	0,18914056
POTENCIA REQUERIDA STORAGE	3,09919671
Nº EVENTOS PLOS	13012
Nº EVENTOS PMIS	16433
ENERGÍA DE CARGA (MWh)	205,206125
ENERGÍA DE DESCARGA (MWh)	148,257634

## Simulación 12





CAPACIDAD REQUERIDA STORAGE	0,19005101
POTENCIA REQUERIDA STORAGE	3,09919671
Nº EVENTOS PLOS	14017
Nº EVENTOS PMIS	13526
ENERGÍA DE CARGA (MWh)	195,234915
ENERGÍA DE DESCARGA (MWh)	168,443059



## ANEXO B: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UNA MÁQUINA AISLADA CON UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO A PRIORI SOBREDIMENSIONADO

### Control de rampas

#### Variaciones de potencias

MÁQUINA, $\mu=0$ $\sigma=7,15$			LIM 20% + BANDAS, $\mu=0$ $\sigma=4,08$			SOLO BANDAS, $\mu=0$ $\sigma=2,88$			SIN LIM 20%, NI BANDAS, $\mu=0$ $\sigma=2,92$		
Clase	Frecuencia	% acumulado	Clase	Frecuencia	% acumulado	Clase	Frecuencia	% acumulado	Clase	Frecuencia	% acumulado
-100	5	0,00%	-100	6	0,00%	-100	0	0,00%	-100	0	0,00%
-95	27	0,01%	-95	109	0,02%	-95	0	0,00%	-95	3	0,00%
-90	32	0,01%	-90	58	0,03%	-90	0	0,00%	-90	0	0,00%
-85	23	0,02%	-85	36	0,04%	-85	0	0,00%	-85	1	0,00%
-80	27	0,02%	-80	21	0,04%	-80	0	0,00%	-80	1	0,00%
-75	33	0,03%	-75	18	0,05%	-75	0	0,00%	-75	0	0,00%
-70	36	0,03%	-70	20	0,05%	-70	0	0,00%	-70	2	0,00%
-65	36	0,04%	-65	17	0,05%	-65	3	0,00%	-65	11	0,00%
-60	35	0,05%	-60	17	0,06%	-60	2	0,00%	-60	10	0,01%
-55	39	0,06%	-55	25	0,06%	-55	3	0,00%	-55	13	0,01%
-50	61	0,07%	-50	21	0,07%	-50	13	0,00%	-50	11	0,01%
-45	77	0,08%	-45	31	0,07%	-45	14	0,01%	-45	22	0,01%
-40	159	0,11%	-40	44	0,08%	-40	14	0,01%	-40	15	0,02%
-35	397	0,19%	-35	50	0,09%	-35	29	0,01%	-35	33	0,02%
-30	831	0,35%	-30	78	0,10%	-30	87	0,03%	-30	85	0,04%
-25	1760	0,68%	-25	126	0,13%	-25	130	0,06%	-25	118	0,06%
-20	3444	1,34%	-20	215	0,17%	-20	120	0,08%	-20	83	0,08%
-15	6596	2,59%	-15	450	0,26%	-15	151	0,11%	-15	85	0,09%
-10	12701	5,01%	-10	1289	0,50%	-10	282	0,16%	-10	174	0,13%
-5,00001	26654	10,08%	-5,00001	5067	1,46%	-5,00001	403	0,24%	-5,00001	196	0,16%
-1,00001	59135	21,33%	-1,00001	101685	20,81%	-1,00001	109889	21,15%	-1,00001	110181	21,13%
-0,00001	45250	29,94%	-0,00001	43147	29,02%	-0,00001	42539	29,24%	-0,00001	42538	29,22%
0	222781	72,32%	0	222779	71,41%	0	220550	71,20%	0	220863	71,24%
1	41449	80,21%	1	40067	79,03%	1	39331	78,68%	1	39366	78,73%
5	53544	90,40%	5	89782	96,11%	5	99605	97,63%	5	99600	97,68%
10	24130	94,99%	10	17840	99,51%	10	12237	99,96%	10	11974	99,96%

15	11619	97,20 %	15	1465	99,78 %	15	65	99,97 %	15	50	99,97 %
20	6375	98,41 %	20	483	99,88 %	20	37	99,98 %	20	41	99,98 %
25	3445	99,07 %	25	205	99,91 %	25	35	99,99 %	25	44	99,98 %
30	1966	99,44 %	30	91	99,93 %	30	28	99,99 %	30	40	99,99 %
35	1165	99,66 %	35	79	99,95 %	35	32	100,00 %	35	38	100,00 %
40	662	99,79 %	40	39	99,95 %	40	0	100,00 %	40	0	100,00 %
45	360	99,86 %	45	36	99,96 %	45	0	100,00 %	45	0	100,00 %
50	228	99,90 %	50	34	99,97 %	50	0	100,00 %	50	1	100,00 %
55	134	99,93 %	55	35	99,97 %	55	0	100,00 %	55	0	100,00 %
60	84	99,94 %	60	21	99,98 %	60	0	100,00 %	60	0	100,00 %
65	62	99,95 %	65	30	99,98 %	65	0	100,00 %	65	0	100,00 %
70	39	99,96 %	70	28	99,99 %	70	0	100,00 %	70	0	100,00 %
75	37	99,97 %	75	12	99,99 %	75	0	100,00 %	75	0	100,00 %
80	35	99,98 %	80	13	99,99 %	80	0	100,00 %	80	0	100,00 %
85	58	99,99 %	85	14	100,00 %	85	0	100,00 %	85	0	100,00 %
90	59	100,00 %	90	12	100,00 %	90	0	100,00 %	90	0	100,00 %
95	9	100,00 %	95	3	100,00 %	95	0	100,00 %	95	0	100,00 %
100	0	100,00 %	100	1	100,00 %	100	0	100,00 %	100	0	100,00 %
y may or...	0	100,00 %	y may or...	0	100,00 %	y may or...	0	100,00 %	y may or...	0	100,00 %

<b>Máquina</b>		<b>LIM 20% + BANDAS</b>		<b>Solo bandas</b>		<b>SIN LIM 20%, NI BANDAS (15)</b>	
Media	0,000136	Media	0,000127	Media	0,00012	Media	0,00012
Error típico	0,009858	Error típico	0,005627	Error típico	0,003973	Error típico	0,004021
Mediana	0	Mediana	0	Mediana	0	Mediana	0
Moda	0	Moda	0	Moda	0	Moda	0
Desviación estándar	7,146945	Desviación estándar	4,079676	Desviación estándar	2,880166	Desviación estándar	2,915105
Varianza de la muestra	51,07882	Varianza de la muestra	16,64376	Varianza de la muestra	8,295355	Varianza de la muestra	8,497835
Curtosis	24,91296	Curtosis	172,0634	Curtosis	17,92724	Curtosis	38,14018
Coeficiente	0,40578	Coeficiente	-	Coeficiente	-	Coeficiente	-1,75685



de asimetría	7	de asimetría	4,68868	de asimetría	1,06888	de asimetría	
Rango	202,293 3	Rango	205,706 4	Rango	99,72	Rango	145,866 7
Mínimo	-108,307	Mínimo	-108,307	Mínimo	-66,84	Mínimo	-97,12
Máximo	93,9866 7	Máximo	97,3998 8	Máximo	32,88	Máximo	48,7466 7
Suma	71,6033 3	Suma	66,7387 6	Suma	63,0566 7	Suma	63,0566 7
Cuenta	525599	Cuenta	525599	Cuenta	525599	Cuenta	525599

### Pstorage

	LIM 20% + BANDAS, $\mu=0$ $\sigma=0,17$		SOLO BANDAS, $\mu=0$ $\sigma=0,21$		SIN LIM 20%, NI BANDAS, $\mu=0$ $\sigma=0,21$	
	Clase	Frecuencia	Clase	Frecuencia	Clase	Frecuencia
-2	-2	21	-2	268	-2	268
(-2, -1,875]	-1,875	14	-1,875	37	-1,875	37
(-1,875, -1,75]	-1,75	15	-1,75	199	-1,75	189
(-1,75, -1,625]	-1,625	15	-1,625	178	-1,625	165
(-1,625, -1,5]	-1,5	28	-1,5	184	-1,5	170
(-1,5, -1,375]	-1,375	67	-1,375	207	-1,375	203
(-1,375, -1,25]	-1,25	107	-1,25	256	-1,25	233
(-1,25, -1,125]	-1,125	182	-1,125	278	-1,125	258
(-1,125, -1]	-1	344	-1	482	-1	473
(-1, -0,875]	-0,875	660	-0,875	764	-0,875	756
(-0,875, -0,75]	-0,75	1066	-0,75	1175	-0,75	1165
(-0,75, -0,625]	-0,625	1728	-0,625	1816	-0,625	1821
(-0,625, -0,5]	-0,5	2802	-0,5	2914	-0,5	2939
(-0,5, -0,375]	-0,375	4433	-0,375	4645	-0,375	4722
(-0,375, -0,25]	-0,25	6814	-0,25	7320	-0,25	7406
(-0,25, -0,125]	-0,125	10689	-0,125	12131	-0,125	12243
(-0,125, 0)	-0,1	17048	-0,1	21694	-0,1	21850
0	0	426655	0	410067	0	410061
(0, 0,125]	0,125	20691	0,125	22416	0,125	22353
(0,125, 0,25]	0,25	11646	0,25	13179	0,25	13108
(0,25, 0,375]	0,375	7267	0,375	8304	0,375	8221
(0,375, 0,5]	0,5	4480	0,5	5307	0,5	5263
(0,5, 0,625]	0,625	2760	0,625	3415	0,625	3384
(0,625, 0,75]	0,75	1856	0,75	2368	0,75	2336
(0,75, 0,875]	0,875	1258	0,875	1693	0,875	1673
(0,875, 1]	1	774	1	1146	1	1117
(1, 1,125]	1,125	536	1,125	835	1,125	821
(1,125, 1,25]	1,25	374	1,25	586	1,25	556
(1,25, 1,375]	1,375	285	1,375	440	1,375	428
(1,375, 1,5]	1,5	239	1,5	360	1,5	361

(1,5, 1,625]	1,625	172	1,625	261	1,625	268
(1,625, 1,75]	1,75	150	1,75	184	1,75	192
(1,75, 1,875]	1,875	126	1,875	175	1,875	189
(1,875, 2)	1,9999	63	1,9999	83	1,9999	97
2	2	235	2	233	2	274

<b>LIM 20% + BANDAS (13)</b>		<b>Solo bandas (14)</b>		<b>SIN LIM 20%, NI BANDAS (15)</b>	
Media	0,00550	Media	0,00682	Media	0,00681
Error típico	0,00024	Error típico	0,00029	Error típico	0,00029
Mediana	0	Mediana	0	Mediana	0
Moda	0	Moda	0	Moda	0
Desviación estándar	0,17420	Desviación estándar	0,20808	Desviación estándar	0,20799
Varianza de la muestra	0,03034	Varianza de la muestra	0,04330	Varianza de la muestra	0,04326
Curtosis	33,71118	Curtosis	29,4616	Curtosis	30,0356
Coeficiente de asimetría	1,94050	Coeficiente de asimetría	0,53098	Coeficiente de asimetría	0,67879
Rango	4	Rango	4	Rango	4
Mínimo	-2	Mínimo	-2	Mínimo	-2
Máximo	2	Máximo	2	Máximo	2
Suma	2891,20	Suma	3586,66	Suma	3577,49
Cuenta	525599	Cuenta	525600	Cuenta	525600

SOC

<b>LIM 20% + BANDAS</b>		<b>SOLO BANDAS</b>		<b>SIN LIM 20%, NI BANDAS</b>	
<i>Clase</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Clase</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Clase</i>	<i>Frecuencia</i>
2,5	0	2,5	0	2,5	0
5	0	5	0	5	0
7,5	0	7,5	0	7,5	0
10	0	10	0	10	0
12,5	0	12,5	0	12,5	0
15	0	15	0	15	0
17,5	0	17,5	0	17,5	0
20	0	20	0	20	0
22,5	0	22,5	0	22,5	0
25	0	25	284	25	9594
27,5	0	27,5	397	27,5	100975
30	0	30	810	30	40441
32,5	0	32,5	1280	32,5	52296
35	162	35	14937	35	51742
37,5	4664	37,5	124809	37,5	51705
40	1259	40	59416	40	35759
42,5	3087	42,5	50382	42,5	35596

45	1931	45	46174	45	17493
47,5	1624	47,5	46311	47,5	24323
50	4371	50	30184	50	12814
52,5	4431	52,5	24823	52,5	16611
55	4788	55	17010	55	15486
57,5	15642	57,5	17401	57,5	5048
60	6950	60	12172	60	6485
62,5	12219	62,5	23311	62,5	6904
65	20612	65	10550	65	7292
67,5	10666	67,5	7092	67,5	4108
70	21348	70	5967	70	3191
72,5	24033	72,5	5394	72,5	6932
75	32669	75	7122	75	4595
77,5	43504	77,5	3724	77,5	4111
80	51635	80	5140	80	2251
82,5	47657	82,5	1233	82,5	1347
85	42224	85	5147	85	919
87,5	39456	87,5	835	87,5	3428
90	36524	90	346	90	3091
92,5	40544	92,5	535	92,5	443
95	45603	95	2802	95	539
97,5	7997	97,5	12	97,5	81
y mayor...	0	y mayor...	0	y mayor...	0

## Filtraje

### Variaciones de potencia

MÁQUINA, $\mu=0$ $\sigma=7,15$			LIM 20% + BANDAS, $\mu=0$ $\sigma=3,58$			SOLO BANDAS, $\mu=0$ $\sigma=1,34$			SIN LIM 20%, NI BANDAS, $\mu=0$ $\sigma=1,44$		
Clase	Frecuencia	% acumulado	Clase	Frecuencia	% acumulado	Clase	Frecuencia	% acumulado	Clase	Frecuencia	% acumulado
-100	5	0,00%	-100	26	0,00%	-100	0	0,00%	-100	0	0,00%
-95	27	0,01%	-95	82	0,02%	-95	0	0,00%	-95	0	0,00%
-90	32	0,01%	-90	58	0,03%	-90	0	0,00%	-90	0	0,00%
-85	23	0,02%	-85	43	0,04%	-85	0	0,00%	-85	0	0,00%
-80	27	0,02%	-80	23	0,04%	-80	0	0,00%	-80	0	0,00%
-75	33	0,03%	-75	24	0,05%	-75	0	0,00%	-75	0	0,00%
-70	36	0,03%	-70	22	0,05%	-70	0	0,00%	-70	1	0,00%
-65	36	0,04%	-65	18	0,06%	-65	0	0,00%	-65	1	0,00%
-60	35	0,05%	-60	24	0,06%	-60	0	0,00%	-60	2	0,00%
-55	39	0,06%	-55	30	0,07%	-55	4	0,00%	-55	3	0,00%
-50	61	0,07%	-50	36	0,07%	-50	4	0,00%	-50	5	0,00%
-45	77	0,08%	-45	49	0,08%	-45	12	0,00%	-45	10	0,00%

-40	159	0,11%	-40	63	0,09%	-40	5	0,00%	-40	18	0,01%
-35	396	0,19%	-35	86	0,11%	-35	15	0,01%	-35	34	0,01%
-30	834	0,35%	-30	144	0,14%	-30	66	0,02%	-30	87	0,03%
-25	1758	0,68%	-25	191	0,17%	-25	87	0,04%	-25	108	0,05%
-20	3445	1,34%	-20	262	0,22%	-20	125	0,06%	-20	153	0,08%
-15	6599	2,59%	-15	511	0,32%	-15	163	0,09%	-15	198	0,12%
-10	12698	5,01%	-10	921	0,50%	-10	308	0,15%	-10	322	0,18%
-5	26640	10,08%	-5	4239	1,30%	-5	1469	0,43%	-5	1371	0,44%
-1	59106	21,32%	-1	54163	11,61%	-1	38258	7,71%	-1	38356	7,74%
-0,1	45206	29,92%	-0,1	78183	26,48%	-0,1	120005	30,54%	-0,1	107986	28,28%
0	222958	72,34%	0	222813	68,88%	0	195092	67,66%	0	206920	67,65%
1	41364	80,21%	1	98091	87,54%	1	124497	91,35%	1	123756	91,20%
5	53540	90,40%	5	57635	98,50%	5	44523	99,82%	5	45237	99,80%
10	24127	94,99%	10	5418	99,54%	10	804	99,97%	10	854	99,97%
15	11620	97,20%	15	1226	99,77%	15	47	99,98%	15	50	99,98%
20	6374	98,41%	20	457	99,86%	20	35	99,98%	20	29	99,98%
25	3446	99,07%	25	215	99,90%	25	25	99,99%	25	34	99,99%
30	1966	99,44%	30	112	99,92%	30	23	99,99%	30	23	99,99%
35	1165	99,66%	35	108	99,94%	35	31	100,00%	35	40	100,00%
40	662	99,79%	40	43	99,95%	40	1	100,00%	40	1	100,00%
45	360	99,86%	45	41	99,95%	45	0	100,00%	45	0	100,00%
50	228	99,90%	50	33	99,96%	50	0	100,00%	50	0	100,00%
55	134	99,93%	55	31	99,97%	55	0	100,00%	55	0	100,00%
60	84	99,94%	60	25	99,97%	60	0	100,00%	60	0	100,00%
65	62	99,95%	65	22	99,98%	65	0	100,00%	65	0	100,00%
70	39	99,96%	70	39	99,98%	70	0	100,00%	70	0	100,00%
75	37	99,97%	75	16	99,99%	75	0	100,00%	75	0	100,00%
80	35	99,98%	80	18	99,99%	80	0	100,00%	80	0	100,00%
85	58	99,99%	85	16	99,99%	85	0	100,00%	85	0	100,00%
90	59	100,00%	90	17	100,00%	90	0	100,00%	90	0	100,00%
95	9	100,00%	95	15	100,00%	95	0	100,00%	95	0	100,00%
100	0	100,00%	100	10	100,00%	100	0	100,00%	100	0	100,00%
y mayo r...	0	100,00%	y mayo r...	0	100,00%	y mayo r...	0	100,00%	y mayo r...	0	100,00%

## Pstorage

LIM 20% + BANDAS, $\mu=0$ $\sigma=0,24$		SOLO BANDAS, $\mu=0$ $\sigma=0,28$		SIN LIM 20%, NI BANDAS, $\mu=0$ $\sigma=0,28$	
Clase	Frecuencia	Clase	Frecuencia	Clase	Frecuencia
-2	12	-2	234	-2	234
-1,875	14	-1,875	53	-1,875	54
-1,75	19	-1,75	222	-1,75	225
-1,625	29	-1,625	186	-1,625	186
-1,5	45	-1,5	221	-1,5	234
-1,375	131	-1,375	237	-1,375	250
-1,25	227	-1,25	443	-1,25	457
-1,125	444	-1,125	677	-1,125	720
-1	890	-1	1062	-1	1125
-0,875	1565	-0,875	1714	-0,875	1779
-0,75	2539	-0,75	2702	-0,75	2874
-0,625	4104	-0,625	4155	-0,625	4386
-0,5	6045	-0,5	6430	-0,5	6547
-0,375	8664	-0,375	9730	-0,375	9982
-0,25	12040	-0,25	15520	-0,25	15613
-0,125	16444	-0,125	27050	-0,125	26874
-0,00001	39179	-0,00001	88054	-0,00001	72299
0	309812	0	196926	0	211739
0,125	56517	0,125	82227	0,125	81075
0,25	23896	0,25	33096	0,25	33393
0,375	15973	0,375	19753	0,375	20006
0,5	9980	0,5	12211	0,5	12316
0,625	6278	0,625	7811	0,625	7933
0,75	3855	0,75	5163	0,75	5235
0,875	2333	0,875	3271	0,875	3326
1	1485	1	2148	1	2214
1,125	962	1,125	1433	1,125	1474
1,25	593	1,25	856	1,25	906
1,375	396	1,375	608	1,375	654
1,5	285	1,5	441	1,5	459
1,625	203	1,625	306	1,625	318
1,75	161	1,75	198	1,75	223
1,875	149	1,875	174	1,875	178
1,9999	77	1,9999	83	1,9999	91
2	254	2	205	2	221

LIM 20% + BANDAS		SOLO BANDAS		SIN LIM 20%, NI BANDAS	
Clase	Frecuencia	Clase	Frecuencia	Clase	Frecuencia
2,5	0	2,5	0	2,5	0
5	0	5	0	5	0
7,5	0	7,5	0	7,5	0
10	0	10	0	10	0
12,5	0	12,5	0	12,5	0
15	0	15	0	15	0
17,5	0	17,5	0	17,5	0
20	0	20	0	20	0
22,5	0	22,5	0	22,5	0
25	0	25	1290	25	214995
27,5	0	27,5	3039	27,5	97291
30	0	30	9159	30	48344
32,5	28	32,5	23199	32,5	34365
35	111	35	267340	35	27742
37,5	627	37,5	81171	37,5	27647
40	626	40	39392	40	25052
42,5	3776	42,5	26615	42,5	23021
45	962	45	20976	45	14477
47,5	5213	47,5	14994	47,5	6803
50	6443	50	13348	50	2530
52,5	5248	52,5	10156	52,5	542
55	19974	55	7915	55	795
57,5	11531	57,5	4281	57,5	527
60	17215	60	1197	60	447
62,5	22176	62,5	471	62,5	288
65	24514	65	412	65	174
67,5	17139	67,5	333	67,5	248
70	35370	70	152	70	148
72,5	38299	72,5	61	72,5	65
75	42685	75	61	75	61
77,5	53344	77,5	38	77,5	38
80	25227	80	0	80	0
82,5	27526	82,5	0	82,5	0
85	25659	85	0	85	0
87,5	29449	87,5	0	87,5	0
90	27474	90	0	90	0
92,5	27976	92,5	0	92,5	0
95	43183	95	0	95	0
97,5	13825	97,5	0	97,5	0
y mayor...	0	y mayor...	0	y mayor...	0

## Firming

### Pstorage

LIM 20% + BANDAS, $\mu=0,01$ $\sigma=0,28$		SOLO BANDAS, $\mu=0,01$ $\sigma=0,29$		SIN LIM 20%, NI BANDAS, $\mu=0,01$ $\sigma=0,30$	
Clase	Frecuencia	Clase	Frecuencia	Clase	Frecuencia
-2	539	-2	704	-2	770
-1,875	78	-1,875	101	-1,875	95
-1,75	109	-1,75	143	-1,75	134
-1,625	117	-1,625	153	-1,625	154
-1,5	216	-1,5	245	-1,5	236
-1,375	323	-1,375	374	-1,375	365
-1,25	485	-1,25	577	-1,25	580
-1,125	688	-1,125	787	-1,125	772
-1	1014	-1	1185	-1	1191
-0,875	1471	-0,875	1694	-0,875	1702
-0,75	2039	-0,75	2404	-0,75	2424
-0,625	2938	-0,625	3467	-0,625	3484
-0,5	7569	-0,5	5120	-0,5	5142
-0,375	7385	-0,375	7690	-0,375	7669
-0,25	10673	-0,25	11709	-0,25	11716
-0,125	16190	-0,125	19813	-0,125	19066
-0,00001	24754	-0,00001	42298	-0,00001	38206
0	370605	0	316742	0	330657
0,125	22082	0,125	45590	0,125	39076
0,25	17222	0,25	22942	0,25	20073
0,375	10248	0,375	12328	0,375	12157
0,5	7299	0,5	7991	0,5	8027
0,625	5368	0,625	5608	0,625	5645
0,75	4114	0,75	4064	0,75	4100
0,875	2946	0,875	2920	0,875	2940
1	2218	1	2193	1	2206
1,125	1594	1,125	1571	1,125	1599
1,25	1146	1,25	1133	1,25	1138
1,375	831	1,375	821	1,375	831
1,5	694	1,5	680	1,5	700
1,625	515	1,625	505	1,625	513
1,75	369	1,75	358	1,75	374
1,875	302	1,875	286	1,875	305
1,9999	197	1,9999	202	1,9999	212
2	1262	2	1202	2	1341

LIM 20% + BANDAS		SOLO BANDAS		SIN LIM 20%, NI BANDAS	
Clase	Frecuencia	Clase	Frecuencia	Clase	Frecuencia
2,5	0	2,5	0	2,5	0
5	0	5	0	5	0
7,5	0	7,5	0	7,5	0
10	0	10	0	10	0
12,5	0	12,5	0	12,5	0
15	0	15	0	15	0
17,5	0	17,5	0	17,5	0
20	0	20	0	20	0
22,5	0	22,5	0	22,5	0
25	889	25	1200	25	18630
27,5	7459	27,5	13261	27,5	72223
30	19912	30	34420	30	41153
32,5	37806	32,5	54926	32,5	34038
35	275720	35	47362	35	35333
37,5	48474	37,5	39026	37,5	35864
40	27477	40	38589	40	25906
42,5	24699	42,5	34517	42,5	20715
45	17712	45	22700	45	27603
47,5	14934	47,5	31955	47,5	17822
50	9862	50	24491	50	19242
52,5	9949	52,5	24889	52,5	20468
55	5418	55	14415	55	15441
57,5	4571	57,5	16481	57,5	15716
60	3526	60	14898	60	12743
62,5	3110	62,5	13554	62,5	11108
65	1861	65	14400	65	12229
67,5	1541	67,5	15935	67,5	7478
70	1829	70	8010	70	12375
72,5	2198	72,5	9407	72,5	10565
75	3051	75	10103	75	6812
77,5	1299	77,5	5704	77,5	7622
80	996	80	6976	80	9662
82,5	500	82,5	10012	82,5	4710
85	359	85	4217	85	4420
87,5	101	87,5	6413	87,5	7837
90	102	90	3146	90	5511
92,5	107	92,5	2677	92,5	3618
95	116	95	1492	95	7114
97,5	22	97,5	424	97,5	1642
y mayor...	0	y mayor...	0	y mayor...	0





## ANEXO C: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL PARQUE COMPLETO DE BARÁSOAIN CON UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO A PRIORI SOBREDIMENSIONADO

Se realizan simulaciones de control del *ramp-rate* y de filtrado de la potencia inyectada a la red bajo las mismas condiciones de batería (sobredimensionada) para optimizar después el dimensionamiento de la misma.

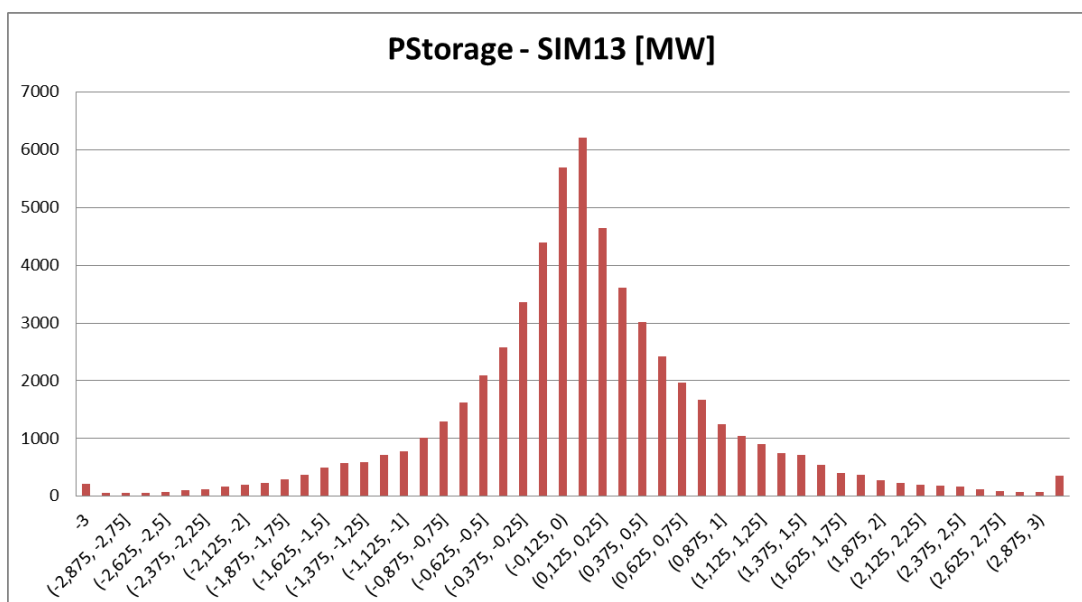
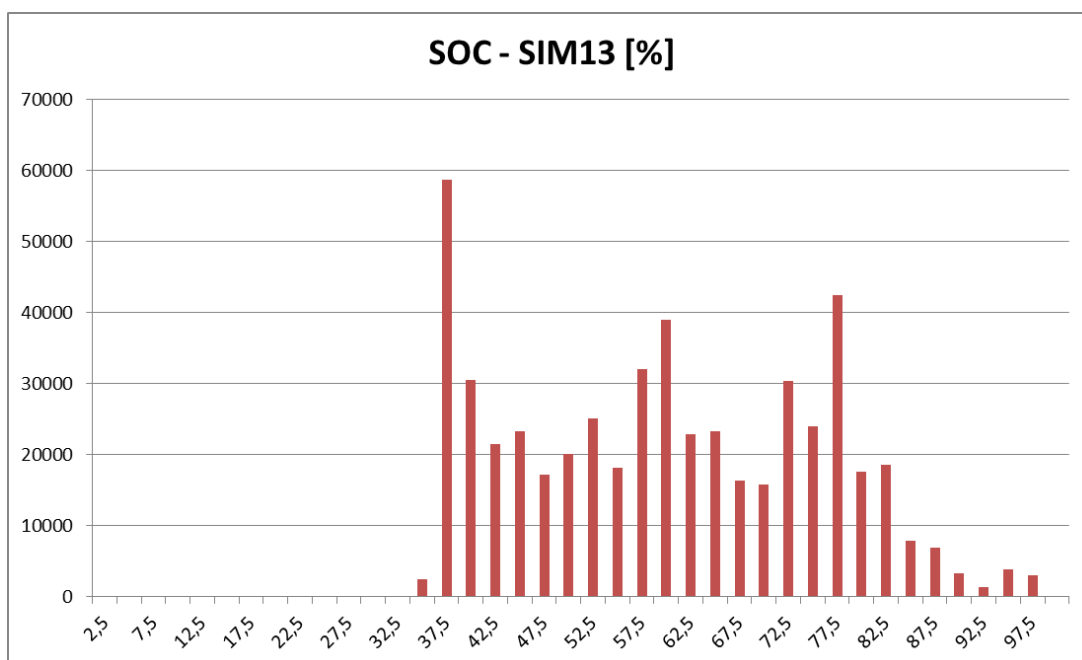
Las simulaciones realizadas son:

1. *Ramp-rate* 5% de la potencia nominal del parque CON restricción de uso de la batería por debajo del 20% Pn.
2. *Ramp-rate* 5% de la potencia nominal del parque SIN restricción de uso de la batería por debajo del 20% Pn.
3. Filtrado con un estatismo de  $\tau=600$  s CON restricción de uso de la batería por debajo del 20% Pn.
4. Filtrado con un estatismo de  $\tau=600$  s SIN restricción de uso de la batería por debajo del 20% Pn.
5. *Ramp-rate* 5% de la potencia nominal del parque SIN restricción de uso de la batería por debajo del 20% Pn y SIN control de bandas del SOC.
6. Filtrado con un estatismo de  $\tau=600$  s SIN restricción de uso de la batería por debajo del 20% Pn y SIN control de bandas del SOC.
7. *Firming* diez minutos desviación máxima 5% de la potencia nominal del parque CON restricción de uso de la batería por debajo del 20% Pn.
8. *Firming* diez minutos desviación máxima 5% de la potencia nominal del parque SIN restricción de uso de la batería por debajo del 20% Pn.
9. *Firming* diez minutos desviación máxima 5% de la potencia nominal del parque SIN restricción de uso de la batería por debajo del 20% Pn y SIN control de bandas del SOC.

## CASO 1 (SIM13-GLOBAL)

	SIN ALMACENAMIENTO		CON ALMACENAMIENTO	
INTERVALO	FRECUENCIA	% ACUMULADO	FRECUENCIA	% ACUMULADO
$x \geq -100\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-100\% > x \geq -95\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-95\% > x \geq -90\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-90\% > x \geq -85\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-85\% > x \geq -80\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-80\% > x \geq -75\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-75\% > x \geq -70\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-70\% > x \geq -65\%$	0	0,00%	2	0,00%
$-65\% > x \geq -60\%$	0	0,00%	4	0,00%
$-60\% > x \geq -55\%$	1	0,00%	1	0,00%
$-55\% > x \geq -50\%$	2	0,00%	5	0,00%
$-50\% > x \geq -45\%$	5	0,00%	2	0,00%
$-45\% > x \geq -40\%$	5	0,00%	5	0,00%
$-40\% > x \geq -35\%$	3	0,00%	6	0,00%
$-35\% > x \geq -30\%$	31	0,01%	12	0,01%
$-30\% > x \geq -25\%$	59	0,02%	21	0,01%
$-25\% > x \geq -20\%$	203	0,06%	37	0,02%
$-20\% > x \geq -15\%$	1.170	0,28%	110	0,04%
$-15\% > x \geq -10\%$	4.222	1,08%	361	0,11%
$-10\% > x \geq -5\%$	21.583	5,19%	2.085	0,50%
$-5\% \geq x > 0\%$	165.414	36,66%	188.110	36,29%
$0\%$	150.449	65,29%	150.449	64,92%
$0\% > x \geq 5\%$	154.458	94,67%	180.426	99,25%
$5\% > x \geq 10\%$	21.202	98,71%	3.704	99,95%
$10\% > x \geq 15\%$	4.877	99,64%	161	99,98%
$15\% > x \geq 20\%$	1.498	99,92%	58	99,99%
$20\% > x \geq 25\%$	282	99,97%	19	100,00%
$25\% > x \geq 30\%$	80	99,99%	9	100,00%
$30\% > x \geq 35\%$	38	100,00%	8	100,00%
$35\% > x \geq 40\%$	5	100,00%	0	100,00%
$40\% > x \geq 45\%$	4	100,00%	0	100,00%
$45\% > x \geq 50\%$	3	100,00%	1	100,00%
$50\% > x \geq 55\%$	1	100,00%	0	100,00%
$55\% > x \geq 60\%$	0	100,00%	1	100,00%
$60\% > x \geq 65\%$	0	100,00%	1	100,00%
$65\% > x \geq 70\%$	1	100,00%	0	100,00%
$70\% > x \geq 75\%$	0	100,00%	0	100,00%
$75\% > x \geq 80\%$	1	100,00%	1	100,00%
$80\% > x \geq 85\%$	1	100,00%	0	100,00%
$85\% > x \geq 90\%$	0	100,00%	0	100,00%
$90\% > x \geq 95\%$	0	100,00%	0	100,00%
$95\% > x \geq 100\%$	1	100,00%	0	100,00%
$x > 100\%$	0	100,00%	0	100,00%

	SIN ALMACENAMIENTO		CON ALMACENAMIENTO	
[-5, 5]	470.321	89,48%	518.985	98,74%
(-10,10]	513.106	97,62%	524.774	99,84%
(-15,15]	522.205	99,35%	525.296	99,94%

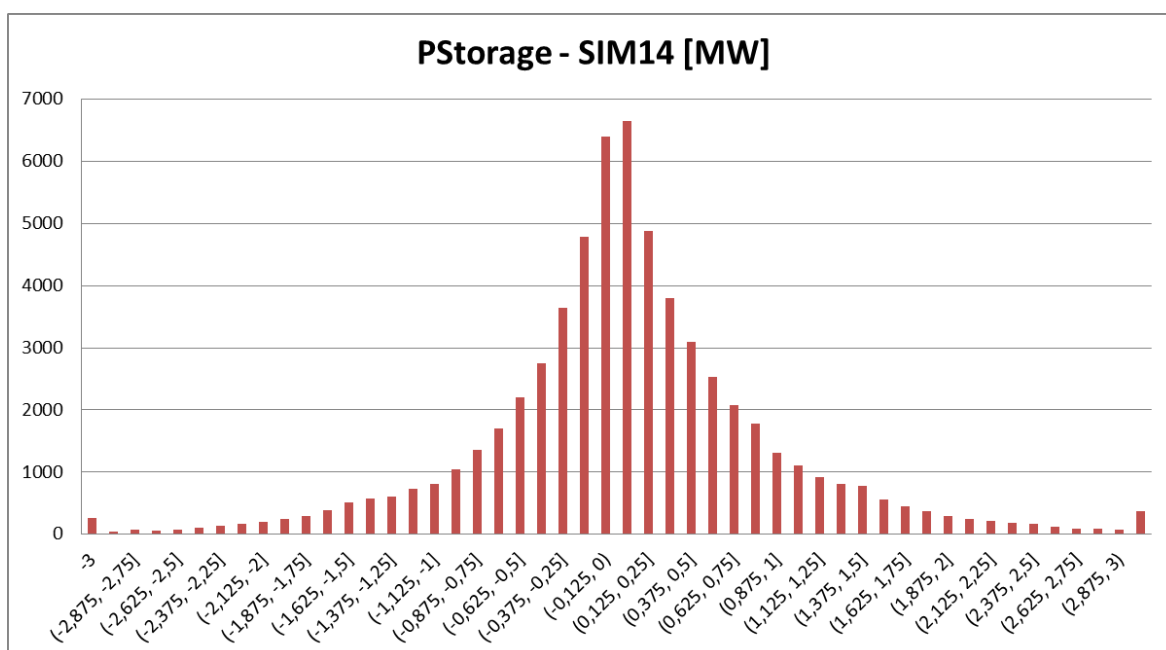
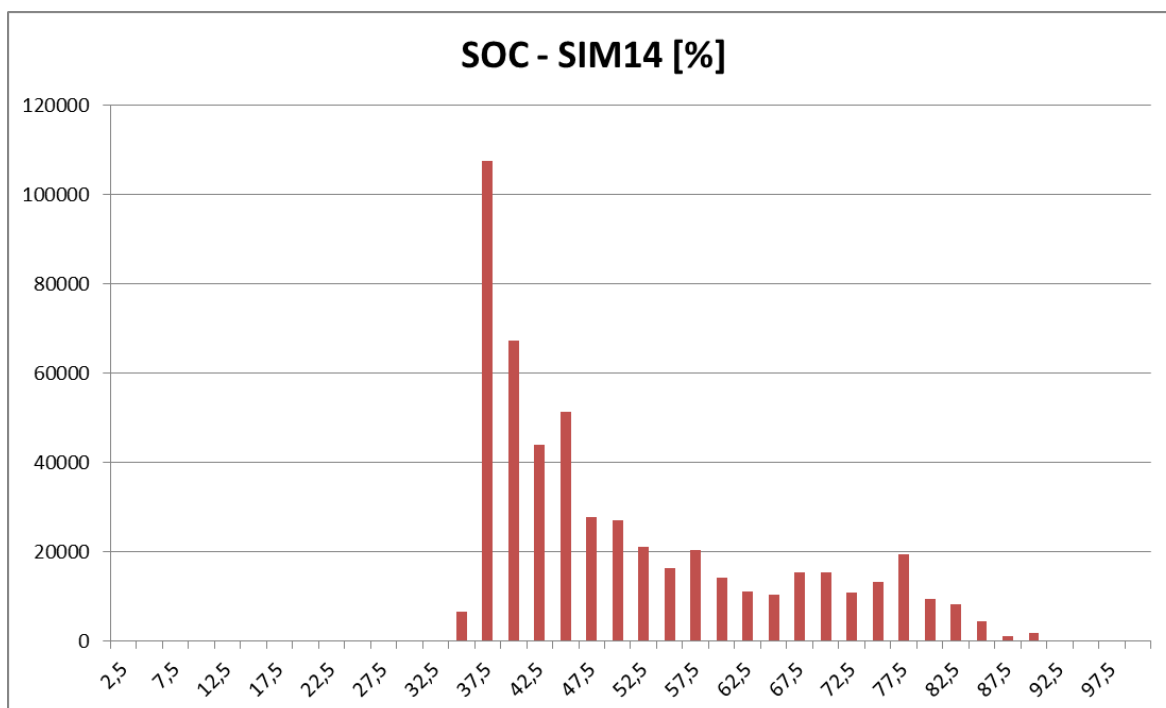


NÚMERO DE CICLOS	17.848
% VIDA BATERÍA USADA	9,37 %
ENERGÍA TRASEGADA CARGA	325,53 MWh
ENERGÍA TRASEGADA DESCARGA	263,24 MWh

## CASO 2 (SIM14-GLOBAL)

	SIN ALMACENAMIENTO		CON ALMACENAMIENTO	
INTERVALO	FRECUENCIA	% ACUMULADO	FRECUENCIA	% ACUMULADO
$x \geq -100\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-100\% > x \geq -95\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-95\% > x \geq -90\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-90\% > x \geq -85\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-85\% > x \geq -80\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-80\% > x \geq -75\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-75\% > x \geq -70\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-70\% > x \geq -65\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-65\% > x \geq -60\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-60\% > x \geq -55\%$	1	0,00%	0	0,00%
$-55\% > x \geq -50\%$	2	0,00%	0	0,00%
$-50\% > x \geq -45\%$	5	0,00%	2	0,00%
$-45\% > x \geq -40\%$	5	0,00%	4	0,00%
$-40\% > x \geq -35\%$	3	0,00%	1	0,00%
$-35\% > x \geq -30\%$	31	0,01%	9	0,00%
$-30\% > x \geq -25\%$	59	0,02%	7	0,00%
$-25\% > x \geq -20\%$	203	0,06%	28	0,01%
$-20\% > x \geq -15\%$	1.170	0,28%	95	0,03%
$-15\% > x \geq -10\%$	4.222	1,08%	251	0,08%
$-10\% > x \geq -5\%$	21.583	5,19%	520	0,17%
$-5\% \geq x > 0\%$	165.414	36,66%	190.019	36,33%
$0\%$	150.449	65,29%	150.422	64,95%
$0\% > x \geq 5\%$	154.458	94,67%	182.393	99,65%
$5\% > x \geq 10\%$	21.202	98,71%	1.670	99,97%
$10\% > x \geq 15\%$	4.877	99,64%	97	99,98%
$15\% > x \geq 20\%$	1.498	99,92%	52	99,99%
$20\% > x \geq 25\%$	282	99,97%	12	100,00%
$25\% > x \geq 30\%$	80	99,99%	7	100,00%
$30\% > x \geq 35\%$	38	100,00%	7	100,00%
$35\% > x \geq 40\%$	5	100,00%	0	100,00%
$40\% > x \geq 45\%$	4	100,00%	1	100,00%
$45\% > x \geq 50\%$	3	100,00%	0	100,00%
$50\% > x \geq 55\%$	1	100,00%	0	100,00%
$55\% > x \geq 60\%$	0	100,00%	2	100,00%
$60\% > x \geq 65\%$	0	100,00%	0	100,00%
$65\% > x \geq 70\%$	1	100,00%	0	100,00%
$70\% > x \geq 75\%$	0	100,00%	0	100,00%
$75\% > x \geq 80\%$	1	100,00%	0	100,00%
$80\% > x \geq 85\%$	1	100,00%	0	100,00%
$85\% > x \geq 90\%$	0	100,00%	0	100,00%
$90\% > x \geq 95\%$	0	100,00%	0	100,00%
$95\% > x \geq 100\%$	1	100,00%	0	100,00%
$x > 100\%$	0	100,00%	0	100,00%

	SIN ALMACENAMIENTO		CON ALMACENAMIENTO	
[-5, 5]	470.321	89,48%	522.834	99,47%
(-10,10]	513.106	97,62%	525.024	99,89%
(-15,15]	522.205	99,35%	525.372	99,96%

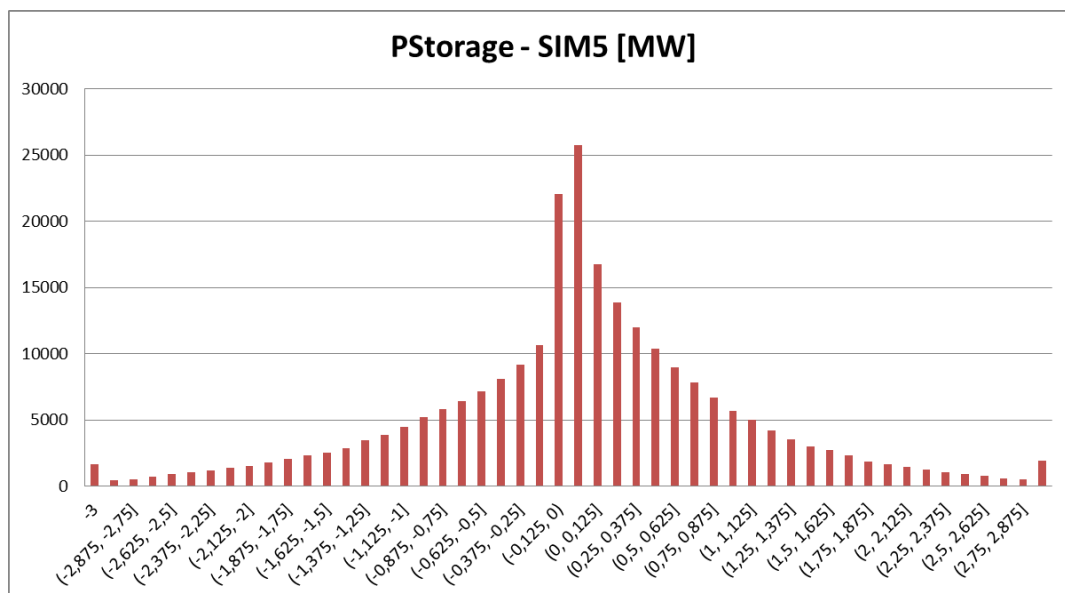
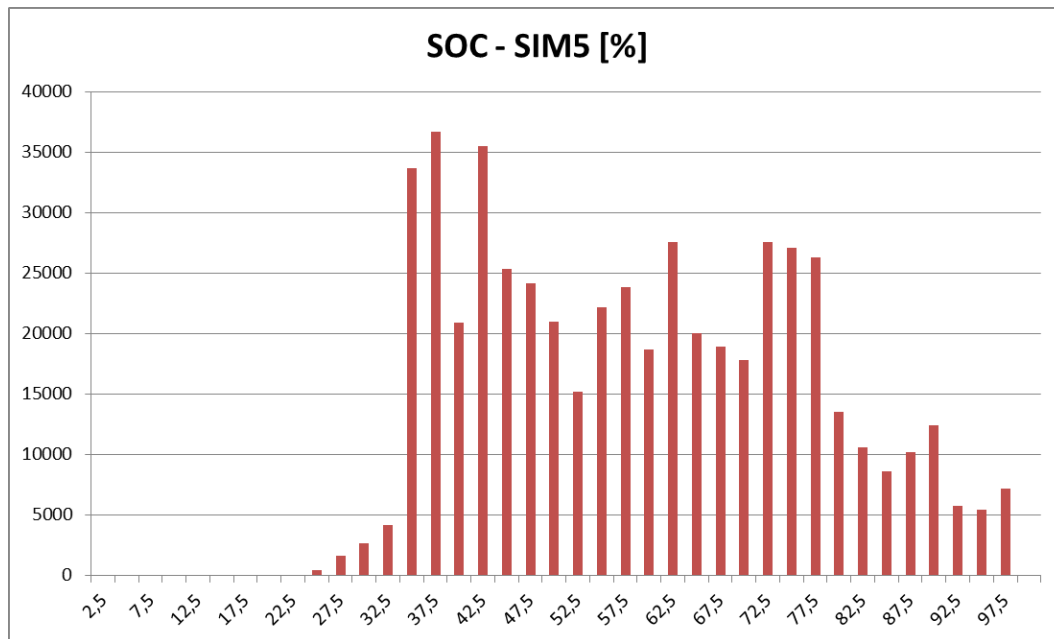


NÚMERO DE CICLOS	19.240
% VIDA BATERÍA USADO	10,12%
ENERGÍA TRASEGADA CARGA	343,73 MWh
ENERGÍA TRASEGADA DESCARGA	278,45 MWh

### CASO 3 (SIM5-GLOBAL)

INTERVALO	SIN ALMACENAMIENTO		CON ALMACENAMIENTO	
	FRECUENCIA	% ACUMULADO	FRECUENCIA	% ACUMULADO
$x \geq -100\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-100\% > x \geq -95\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-95\% > x \geq -90\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-90\% > x \geq -85\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-85\% > x \geq -80\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-80\% > x \geq -75\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-75\% > x \geq -70\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-70\% > x \geq -65\%$	0	0,00%	1	0,00%
$-65\% > x \geq -60\%$	0	0,00%	2	0,00%
$-60\% > x \geq -55\%$	1	0,00%	4	0,00%
$-55\% > x \geq -50\%$	2	0,00%	3	0,00%
$-50\% > x \geq -45\%$	5	0,00%	5	0,00%
$-45\% > x \geq -40\%$	5	0,00%	5	0,00%
$-40\% > x \geq -35\%$	3	0,00%	11	0,01%
$-35\% > x \geq -30\%$	31	0,01%	17	0,01%
$-30\% > x \geq -25\%$	59	0,02%	57	0,02%
$-25\% > x \geq -20\%$	203	0,06%	129	0,04%
$-20\% > x \geq -15\%$	1.170	0,28%	255	0,09%
$-15\% > x \geq -10\%$	4.222	1,08%	611	0,21%
$-10\% > x \geq -5\%$	21.583	5,19%	2.361	0,66%
$-5\% \geq x > -1\%$	84.570	21,28%	42.381	8,72%
$-1\% \geq x > 0\%$	80.844	36,66%	128.795	33,23%
$0\%$	150.449	65,29%	149.981	61,76%
$0\% \geq x > 1\%$	74.604	79,48%	154.844	91,22%
$1\% > x \geq 5\%$	79.854	94,67%	43.246	99,45%
$5\% > x \geq 10\%$	21.202	98,71%	2.242	99,88%
$10\% > x \geq 15\%$	4.877	99,64%	433	99,96%
$15\% > x \geq 20\%$	1.498	99,92%	135	99,98%
$20\% > x \geq 25\%$	282	99,97%	54	99,99%
$25\% > x \geq 30\%$	80	99,99%	13	100,00%
$30\% > x \geq 35\%$	38	100,00%	7	100,00%
$35\% > x \geq 40\%$	5	100,00%	2	100,00%
$40\% > x \geq 45\%$	4	100,00%	0	100,00%
$45\% > x \geq 50\%$	3	100,00%	2	100,00%
$50\% > x \geq 55\%$	1	100,00%	0	100,00%
$55\% > x \geq 60\%$	0	100,00%	1	100,00%
$60\% > x \geq 65\%$	0	100,00%	1	100,00%
$65\% > x \geq 70\%$	1	100,00%	0	100,00%
$70\% > x \geq 75\%$	0	100,00%	0	100,00%
$75\% > x \geq 80\%$	1	100,00%	1	100,00%
$80\% > x \geq 85\%$	1	100,00%	0	100,00%
$85\% > x \geq 90\%$	0	100,00%	0	100,00%
$90\% > x \geq 95\%$	0	100,00%	0	100,00%
$95\% > x \geq 100\%$	1	100,00%	0	100,00%
$x > 100\%$	0	100,00%	0	100,00%

	SIN ALMACENAMIENTO		CON ALMACENAMIENTO	
[-1, 1]	305.897	58,20%	433.620	82,50%
[-5, 5]	470.321	89,48%	519.247	98,79%
[-10,10]	513.106	97,62%	523.850	99,67%
[-15,15]	522.205	99,35%	524.894	99,87%



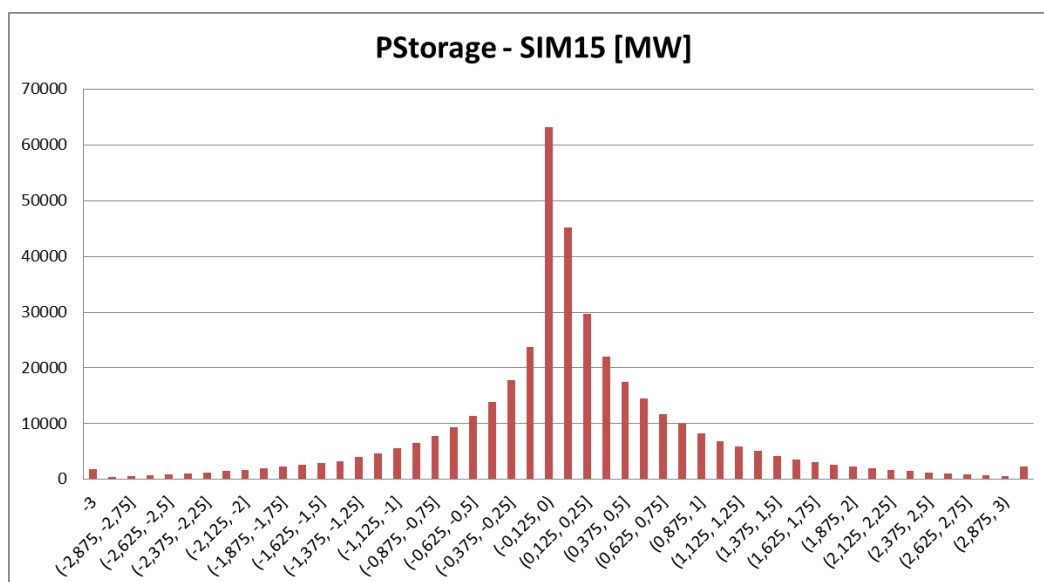
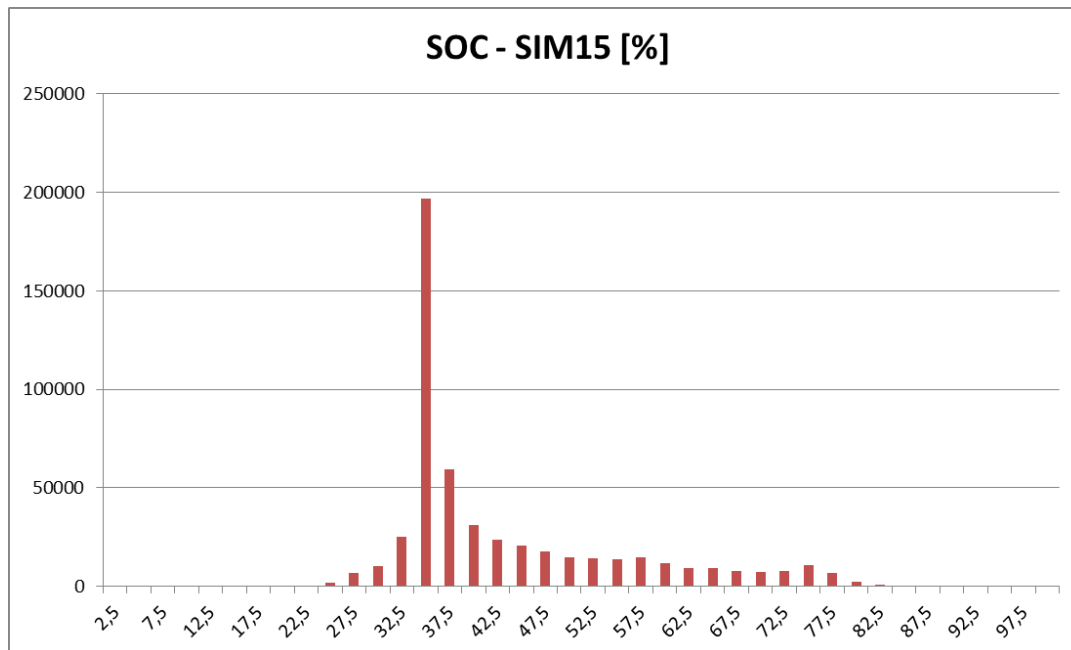
NÚMERO DE CICLOS	25.978
% VIDA BATERÍA USADO	21,65%
ENERGÍA TRASEGADA CARGA	1.728,72 MWh
ENERGÍA TRASEGADA DESCARGA	1.399,93 MWh



## CASO 4 (SIM15-GLOBAL)

	SIN ALMACENAMIENTO		CON ALMACENAMIENTO	
INTERVALO	FRECUENCIA	% ACUMULADO	FRECUENCIA	% ACUMULADO
$x \geq -100\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-100\% > x \geq -95\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-95\% > x \geq -90\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-90\% > x \geq -85\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-85\% > x \geq -80\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-80\% > x \geq -75\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-75\% > x \geq -70\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-70\% > x \geq -65\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-65\% > x \geq -60\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-60\% > x \geq -55\%$	1	0,00%	1	0,00%
$-55\% > x \geq -50\%$	2	0,00%	0	0,00%
$-50\% > x \geq -45\%$	5	0,00%	1	0,00%
$-45\% > x \geq -40\%$	5	0,00%	3	0,00%
$-40\% > x \geq -35\%$	3	0,00%	4	0,00%
$-35\% > x \geq -30\%$	31	0,01%	7	0,00%
$-30\% > x \geq -25\%$	59	0,02%	16	0,01%
$-25\% > x \geq -20\%$	203	0,06%	35	0,01%
$-20\% > x \geq -15\%$	1.170	0,28%	155	0,04%
$-15\% > x \geq -10\%$	4.222	1,08%	421	0,12%
$-10\% > x \geq -5\%$	21.583	5,19%	1.300	0,37%
$-5\% \geq x > -1\%$	84.570	21,28%	22.390	4,63%
$-1\% \geq x > 0\%$	80.844	36,66%	167.965	36,59%
$0\%$	150.449	65,29%	128.815	61,09%
$0\% > x \geq 1\%$	74.604	79,48%	180.601	95,46%
$1\% > x \geq 5\%$	79.854	94,67%	22.616	99,76%
$5\% > x \geq 10\%$	21.202	98,71%	859	99,92%
$10\% > x \geq 15\%$	4.877	99,64%	277	99,97%
$15\% > x \geq 20\%$	1.498	99,92%	81	99,99%
$20\% > x \geq 25\%$	282	99,97%	31	100,00%
$25\% > x \geq 30\%$	80	99,99%	9	100,00%
$30\% > x \geq 35\%$	38	100,00%	5	100,00%
$35\% > x \geq 40\%$	5	100,00%	4	100,00%
$40\% > x \geq 45\%$	4	100,00%	1	100,00%
$45\% > x \geq 50\%$	3	100,00%	0	100,00%
$50\% > x \geq 55\%$	1	100,00%	0	100,00%
$55\% > x \geq 60\%$	0	100,00%	1	100,00%
$60\% > x \geq 65\%$	0	100,00%	1	100,00%
$65\% > x \geq 70\%$	1	100,00%	0	100,00%
$70\% > x \geq 75\%$	0	100,00%	0	100,00%
$75\% > x \geq 80\%$	1	100,00%	0	100,00%
$80\% > x \geq 85\%$	1	100,00%	0	100,00%
$85\% > x \geq 90\%$	0	100,00%	0	100,00%
$90\% > x \geq 95\%$	0	100,00%	0	100,00%
$95\% > x \geq 100\%$	1	100,00%	0	100,00%
$x > 100\%$	0	100,00%	0	100,00%

	SIN ALMACENAMIENTO		CON ALMACENAMIENTO	
[-1, 1]	305.897	58,20%	477.381	90,83%
[-5, 5]	470.321	89,48%	522.387	99,39%
[-10,10]	513.106	97,62%	524.546	99,80%
[-15,15]	522.205	99,35%	525.244	99,93%

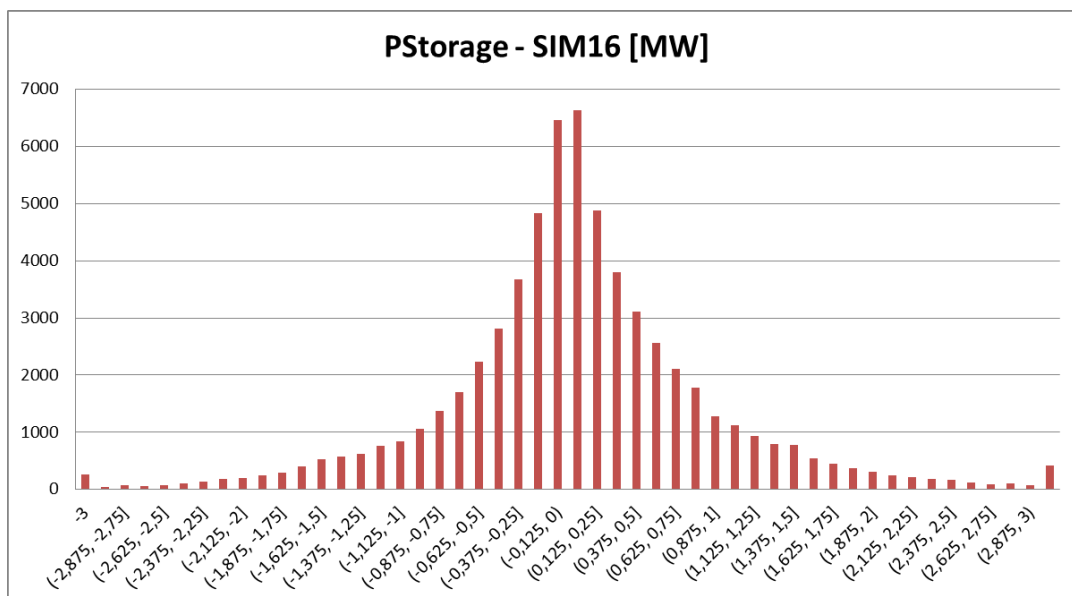
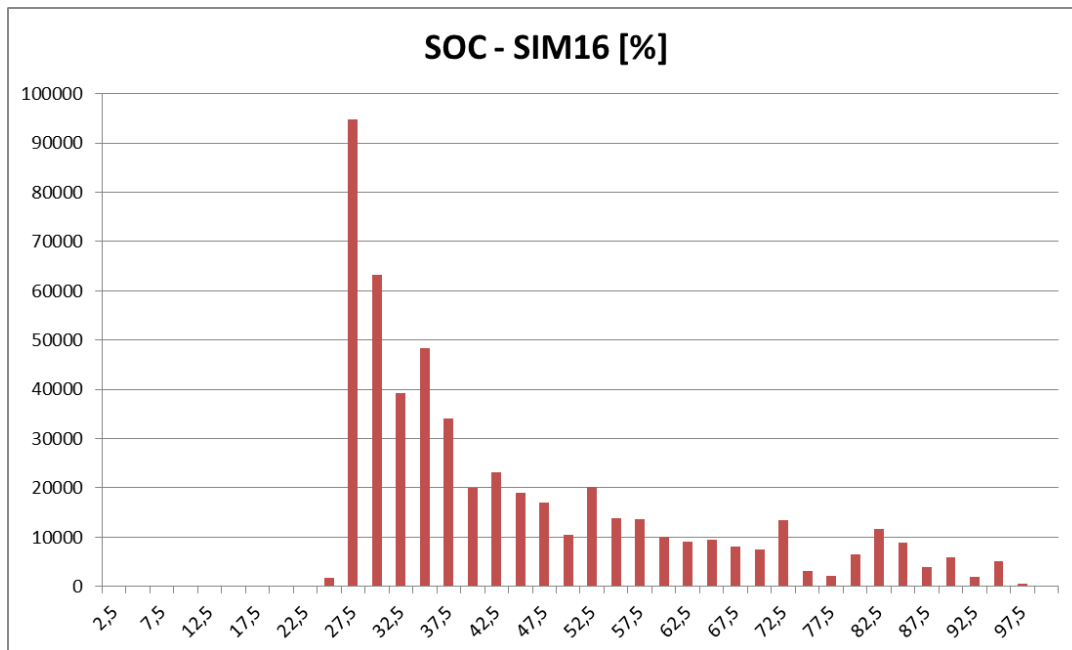


NÚMERO DE CICLOS	36.891
% VIDA BATERÍA USADO	29,40 %
ENERGÍA TRASEGADA CARGA	2.192,45 MWh
ENERGÍA TRASEGADA DESCARGA	1.775,69 MWh

## CASO 5 (SIM16-GLOBAL)

	SIN ALMACENAMIENTO		CON ALMACENAMIENTO	
INTERVALO	FRECUENCIA	% ACUMULADO	FRECUENCIA	% ACUMULADO
$x \geq -100\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-100\% > x \geq -95\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-95\% > x \geq -90\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-90\% > x \geq -85\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-85\% > x \geq -80\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-80\% > x \geq -75\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-75\% > x \geq -70\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-70\% > x \geq -65\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-65\% > x \geq -60\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-60\% > x \geq -55\%$	1	0,00%	0	0,00%
$-55\% > x \geq -50\%$	2	0,00%	0	0,00%
$-50\% > x \geq -45\%$	5	0,00%	3	0,00%
$-45\% > x \geq -40\%$	5	0,00%	5	0,00%
$-40\% > x \geq -35\%$	3	0,00%	2	0,00%
$-35\% > x \geq -30\%$	31	0,01%	11	0,00%
$-30\% > x \geq -25\%$	59	0,02%	20	0,01%
$-25\% > x \geq -20\%$	203	0,06%	30	0,01%
$-20\% > x \geq -15\%$	1.170	0,28%	62	0,03%
$-15\% > x \geq -10\%$	4.222	1,08%	170	0,06%
$-10\% > x \geq -5\%$	21.583	5,19%	323	0,12%
$-5\% \geq x > 0\%$	165.414	36,66%	190.367	36,34%
$0\%$	150.449	65,29%	150.451	64,96%
$0\% > x \geq 5\%$	154.458	94,67%	182.996	99,78%
$5\% > x \geq 10\%$	21.202	98,71%	971	99,96%
$10\% > x \geq 15\%$	4.877	99,64%	97	99,98%
$15\% > x \geq 20\%$	1.498	99,92%	57	99,99%
$20\% > x \geq 25\%$	282	99,97%	15	100,00%
$25\% > x \geq 30\%$	80	99,99%	8	100,00%
$30\% > x \geq 35\%$	38	100,00%	8	100,00%
$35\% > x \geq 40\%$	5	100,00%	0	100,00%
$40\% > x \geq 45\%$	4	100,00%	0	100,00%
$45\% > x \geq 50\%$	3	100,00%	0	100,00%
$50\% > x \geq 55\%$	1	100,00%	0	100,00%
$55\% > x \geq 60\%$	0	100,00%	2	100,00%
$60\% > x \geq 65\%$	0	100,00%	1	100,00%
$65\% > x \geq 70\%$	1	100,00%	0	100,00%
$70\% > x \geq 75\%$	0	100,00%	0	100,00%
$75\% > x \geq 80\%$	1	100,00%	0	100,00%
$80\% > x \geq 85\%$	1	100,00%	0	100,00%
$85\% > x \geq 90\%$	0	100,00%	0	100,00%
$90\% > x \geq 95\%$	0	100,00%	0	100,00%
$95\% > x \geq 100\%$	1	100,00%	0	100,00%
$x > 100\%$	0	100,00%	0	100,00%

	SIN ALMACENAMIENTO		CON ALMACENAMIENTO	
[-5, 5]	470.321	89,48%	523.814	99,66%
(-10,10]	513.106	97,62%	525.108	99,91%
(-15,15]	522.205	99,35%	525.375	99,96%

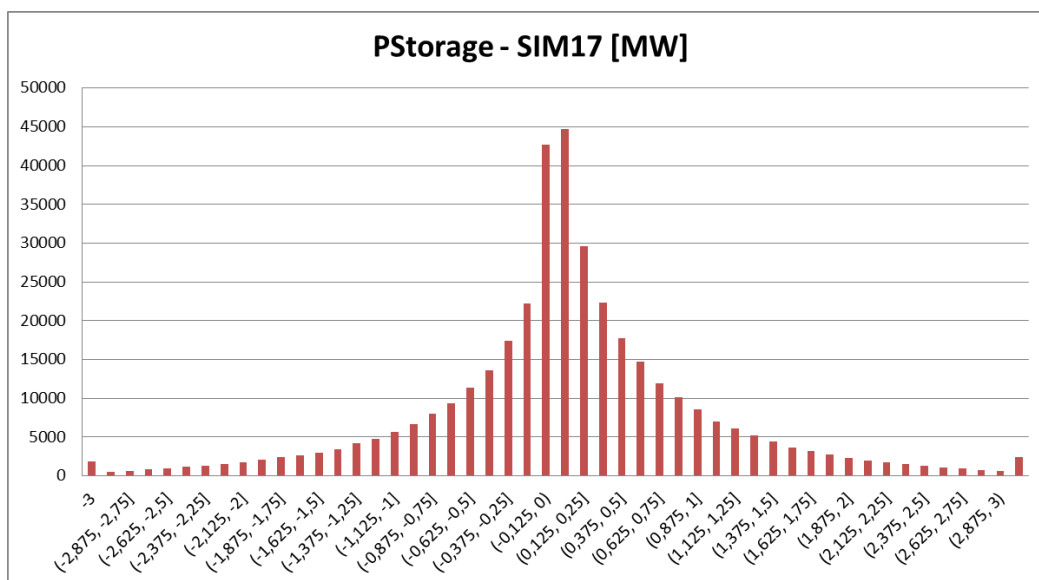
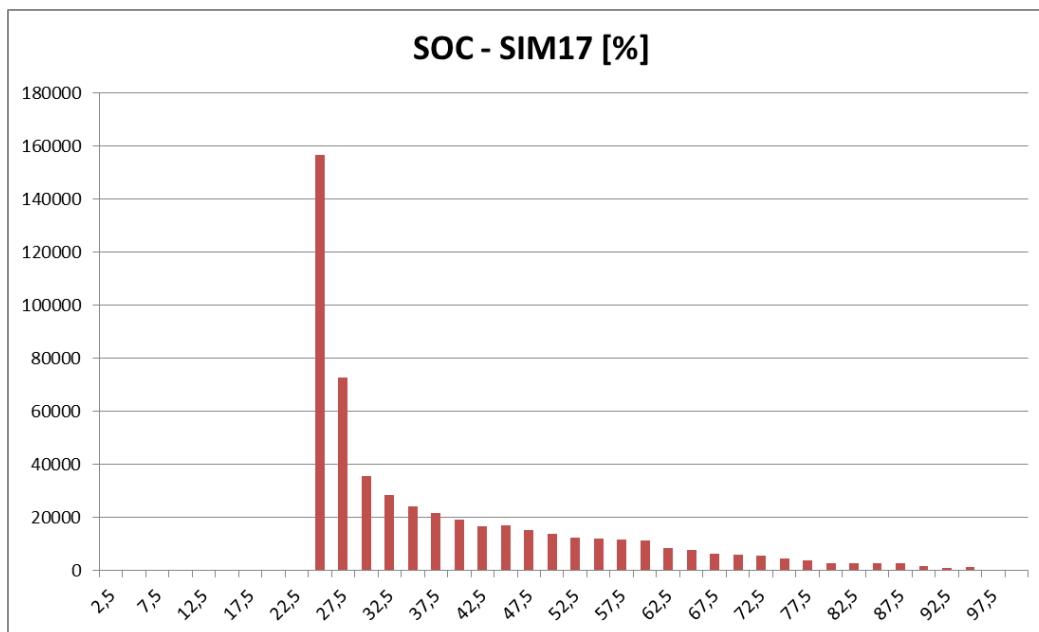


NÚMERO DE CICLOS	19.392
% VIDA BATERÍA USADO	10,19 %
ENERGÍA TRASEGADA CARGA	347,09 MWh
ENERGÍA TRASEGADA DESCARGA	281,35 MWh

## CASO 6 (SIM17-GLOBAL)

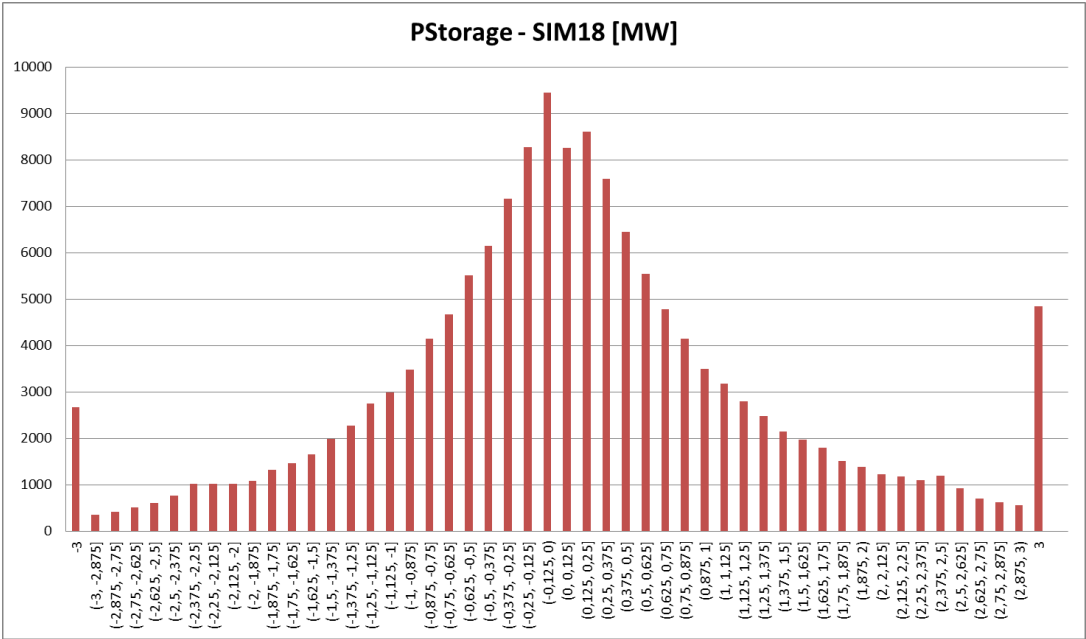
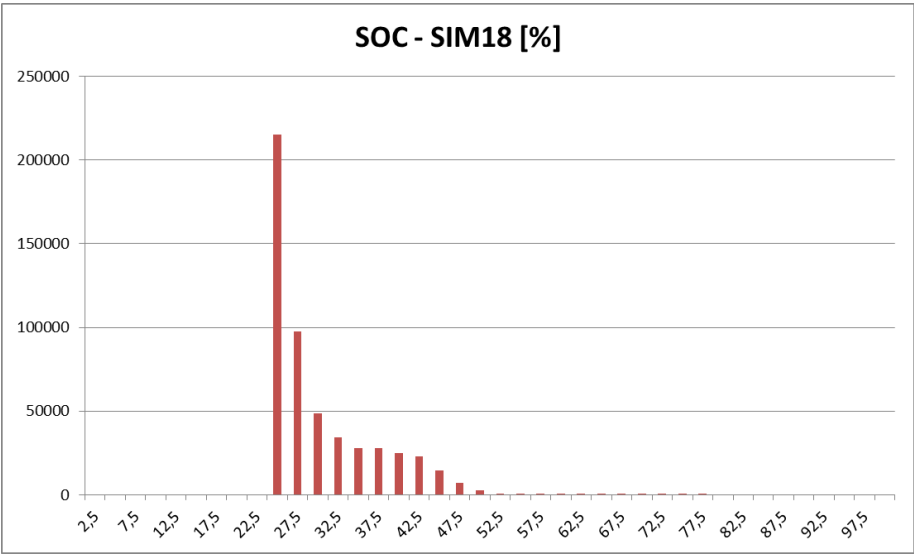
	SIN ALMACENAMIENTO		CON ALMACENAMIENTO	
INTERVALO	FRECUENCIA	% ACUMULADO	FRECUENCIA	% ACUMULADO
$x \geq -100\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-100\% > x \geq -95\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-95\% > x \geq -90\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-90\% > x \geq -85\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-85\% > x \geq -80\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-80\% > x \geq -75\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-75\% > x \geq -70\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-70\% > x \geq -65\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-65\% > x \geq -60\%$	0	0,00%	0	0,00%
$-60\% > x \geq -55\%$	1	0,00%	0	0,00%
$-55\% > x \geq -50\%$	2	0,00%	1	0,00%
$-50\% > x \geq -45\%$	5	0,00%	1	0,00%
$-45\% > x \geq -40\%$	5	0,00%	3	0,00%
$-40\% > x \geq -35\%$	3	0,00%	4	0,00%
$-35\% > x \geq -30\%$	31	0,01%	7	0,00%
$-30\% > x \geq -25\%$	59	0,02%	19	0,01%
$-25\% > x \geq -20\%$	203	0,06%	51	0,02%
$-20\% > x \geq -15\%$	1.170	0,28%	163	0,05%
$-15\% > x \geq -10\%$	4.222	1,08%	426	0,13%
$-10\% > x \geq -5\%$	21.583	5,19%	1.319	0,38%
$-5\% \geq x > -1\%$	84.570	21,28%	22.866	4,73%
$-1\% \geq x > 0\%$	80.844	36,66%	154.737	34,17%
$0\%$	150.449	65,29%	139.029	60,62%
$0\% > x \geq 1\%$	74.604	79,48%	182.588	95,36%
$1\% > x \geq 5\%$	79.854	94,67%	23.203	99,78%
$5\% > x \geq 10\%$	21.202	98,71%	809	99,93%
$10\% > x \geq 15\%$	4.877	99,64%	249	99,98%
$15\% > x \geq 20\%$	1.498	99,92%	74	99,99%
$20\% > x \geq 25\%$	282	99,97%	29	100,00%
$25\% > x \geq 30\%$	80	99,99%	9	100,00%
$30\% > x \geq 35\%$	38	100,00%	5	100,00%
$35\% > x \geq 40\%$	5	100,00%	4	100,00%
$40\% > x \geq 45\%$	4	100,00%	1	100,00%
$45\% > x \geq 50\%$	3	100,00%	0	100,00%
$50\% > x \geq 55\%$	1	100,00%	0	100,00%
$55\% > x \geq 60\%$	0	100,00%	1	100,00%
$60\% > x \geq 65\%$	0	100,00%	1	100,00%
$65\% > x \geq 70\%$	1	100,00%	0	100,00%
$70\% > x \geq 75\%$	0	100,00%	0	100,00%
$75\% > x \geq 80\%$	1	100,00%	0	100,00%
$80\% > x \geq 85\%$	1	100,00%	0	100,00%
$85\% > x \geq 90\%$	0	100,00%	0	100,00%
$90\% > x \geq 95\%$	0	100,00%	0	100,00%
$95\% > x \geq 100\%$	1	100,00%	0	100,00%
$x > 100\%$	0	100,00%	0	100,00%

	SIN ALMACENAMIENTO		CON ALMACENAMIENTO	
[-1, 1]	305.897	58,20%	476.354	90,63%
[-5, 5]	470.321	89,48%	522.423	99,40%
[-10,10]	513.106	97,62%	524.551	99,80%
[-15,15]	522.205	99,35%	525.226	99,93%



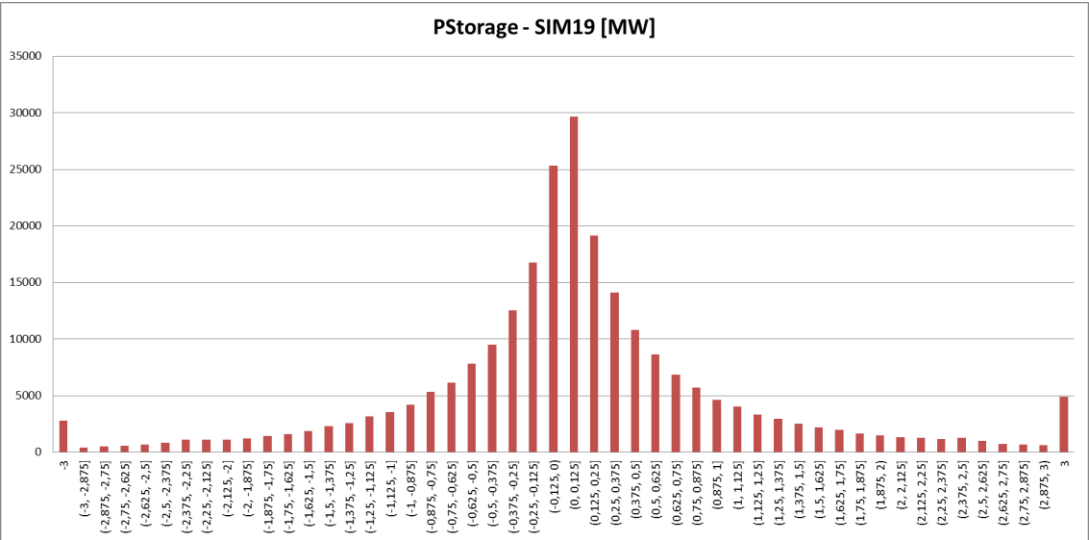
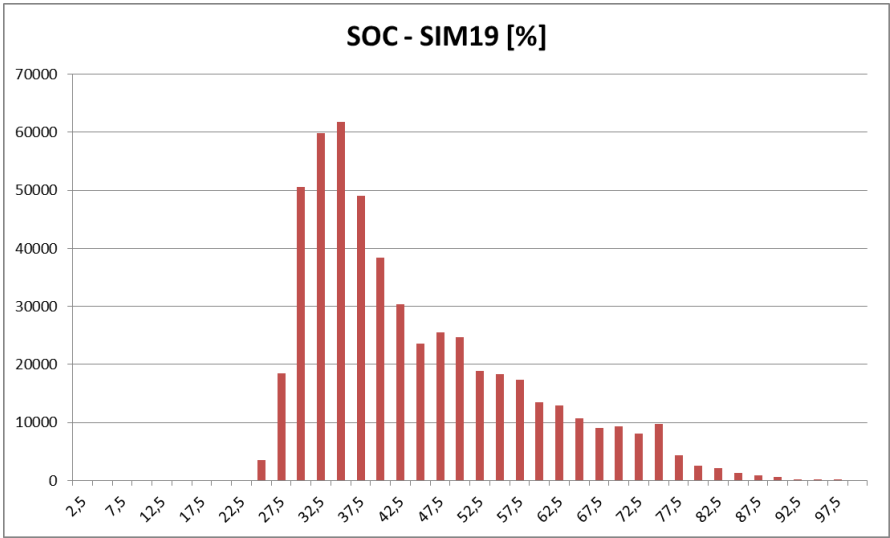
NÚMERO DE CICLOS	34.563
% VIDA BATERÍA USADO	29,02 %
ENERGÍA TRASEGADA CARGA	2.250,53 MWh
ENERGÍA TRASEGADA DESCARGA	1.822,64 MWh

CASO 7 (SIM18-GLOBAL)



ENERGÍA TRASEGADA CARGA	1.039 MWh
ENERGÍA TRASEGADA DESCARGA	1.061 MWh

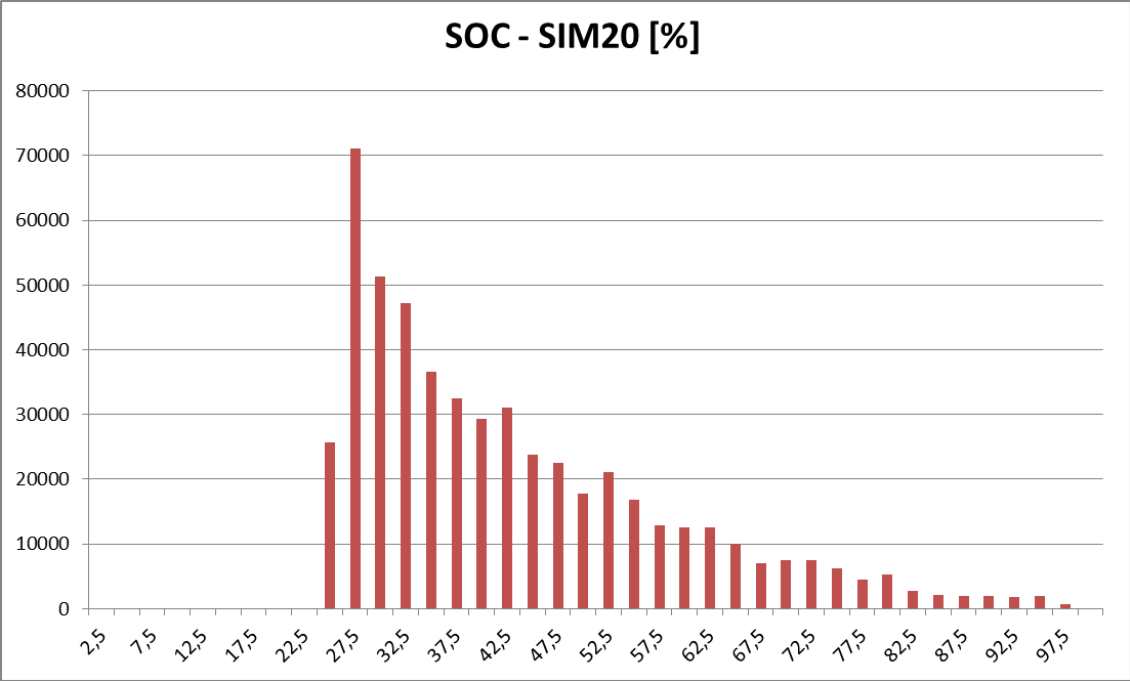
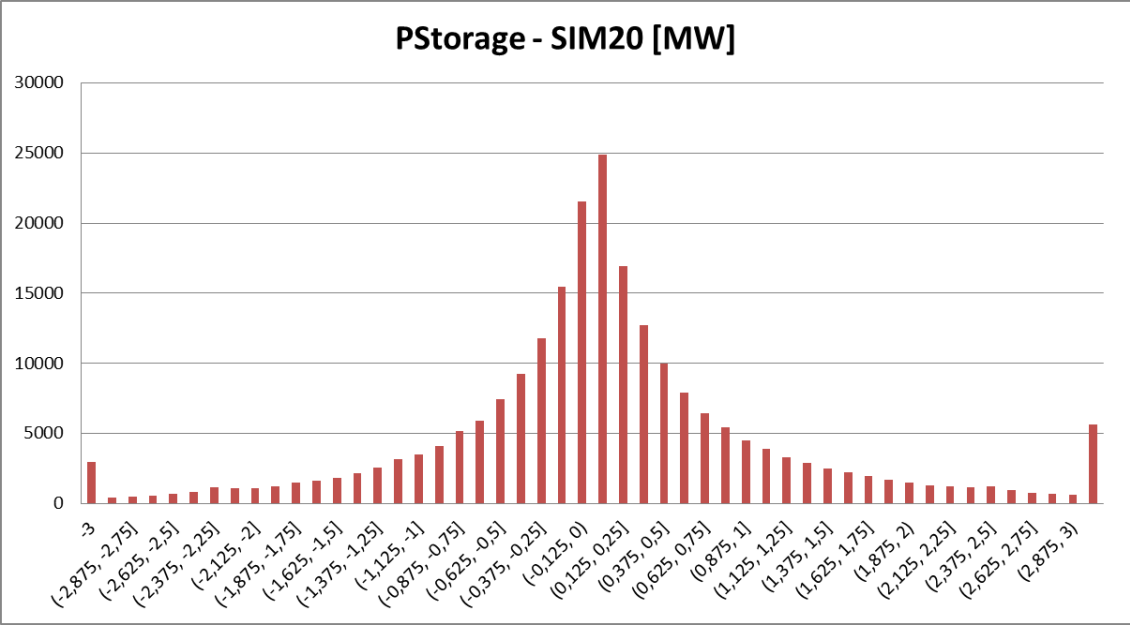
CASO 8 (SIM19-GLOBAL)



ENERGÍA TRASEGADA CARGA	1.594 MWh
ENERGÍA TRASEGADA DESCARGA	1.291 MWh



CASO 9 (SIM20-GLOBAL)



ENERGÍA TRASEGADA CARGA	1.577 MWh
ENERGÍA TRASEGADA DESCARGA	1.277 MWh